

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Tomislav Tirić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Matija Bušić, dipl. ing.

Student:

Tomislav Tirić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Ivici Garašiću na nesebičnoj pomoći, susretljivosti i brojnim savjetima prilikom izrade ovog rada

Također se zahvaljujem asistentu dipl.ing. Matiji Bušiću na velikoj pomoći i korisnim savjetima prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Veliko hvala i svima s Katedre za zavarene konstrukcije na pomoći u izradi eksperimentalnoga dijela rada.

Srdačno zahvaljujem svojim roditeljima i prijateljima na podršci i pomoći tijekom studija.

Tomislav Tirić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **TOMISLAV TIRIĆ**

Mat.br **0035184016**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **ZAŠTITNI PLINOVI PRI TIG ZAVARIVANJU**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **SHIELDING GASES FOR TIG WELDING**

Opis zadatka:

Opisati TIG zavarivanje, parametre i primjenu s obzirom na osnovne materijale. Posebno detaljno proučiti svojstva zaštitnih plinova te klasifikaciju prema normi HRN EN ISO 14175 kao i opcije zaštite korijena. Navesti moguće mješavine za zavarivanje viokolegiranih nehrđajućih čelika kao i utjecaj komponenti plinske mješavine na formiranje mikrostrukture. Dati primjere iz industrijske proizvodnje na kojima je moguće ustanoviti pozitivan utjecaj pojedinih mješavina.

U eksperimentalnom dijelu usporediti karakteristike zavarenog spoja načinjenog TIG postupkom na visokolegiranom nehrđajućem čeliku i to u zaštiti argona i mješavine argona s udjelom od 5% vodika. Za pojedine unose topline ustanoviti moguća poboljšanja i produktivnosti i razlike u geometriji zavora. Zavarivanje provesti robotiziranim TIG postupkom kako bi se eliminirao utjecaj zavarivača. Zaključno predložiti mogućnosti uvođenja mješavina s vodikom u proizvodnju pri TIG zavarivanju visokolegiranih čelika.

Zadatak zadan:
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:
1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 2., 3., 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., 23. rujna 2015.
Predsjednik Povjerenstva:

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Sadržaj

Popis slika.....	III
Popis tablica.....	IV
Popis oznaka.....	V
1. Uvod.....	1
2. TIG zavarivanje.....	2
2.1 Općenito.....	2
2.2 Elektrode za TIG zavarivanje	3
2.2.1 Podjela netaljivih elektroda	3
2.2.2 Oblik elektrode	4
2.3 Izvori struje.....	5
2.3.1 Istosmjerna struja	6
2.3.2 Izmjenična struja	7
2.4 Parametri kod TIG-a.....	8
3. Zaštitni plinovi	9
3.1 Fizikalne karakteristike zaštitnog plina	12
3.2 Opis pojedinačnih zaštitnih plinova	13
3.2.1 Argon.....	13
3.2.2 Helij.....	13
3.2.3 Vodik.....	14
3.2.4 Dušik	14
3.3 Karakteristike argona i helija.....	14
3.4 Plinske mješavine	17
3.5 Zaštita krojena zavara.....	18
3.6 Utjecaj zaštitnih plinova na mehanička svojstva zavara	20
4. Norma HRN EN ISO 14175:2008	22
4.1 Klasifikacija i označavanje.....	23
4.2 Toleriranije mješavine	25
5. Zaštitni plinovi u praksi	26
6. Eksperimentalni rad	29
6.1 Oprema za navarivanje	29
6.2 Izbor elektrode.....	32
6.3 Osnovni materijal	33
6.4 Navarivanje.....	34

6.5	Izrada makroizbruska	38
6.6	Analiza makroizbruska	40
7.	Zaključak.....	45
8.	Literatura.....	46

Popis slika

Slika 1. Usporedba troškova [2]	1
Slika 2. Shematski prikaz elektrolučnog zavarivanja netopljivom elektrodom [1]	2
Slika 3. Utjecaj oblika elektrode na izgled zavara [1].....	4
Slika 4. Usporedba tri vrste valova izmjenične struje [5]	7
Slika 5. Utjecaj plinova i plinskih mješavina na izgled zavara	10
Slika 6. Veza napona i struje električnog luka u odnosu na zaštitne plinove argon	15
Slika 7. Usporedba zavarivanja s helijem i argonom [6]	16
Slika 8. Zaštita korijena zavara u obliku kućišta [3]	19
Slika 9. Bakrena pločica - akumulirani zaštitni plin [1].....	19
Slika 10. Zaštita korijen kod cijevi [1]	20
Slika 11. Utjecaj dodavanja dušika argonu na mehanička svojstva zavara [9].....	21
Slika 12. Mikrostruktura. a) osnovni metal b) pore u ZUT-u c) zavar zavaren sa Ar+0,015%N ₂ d) Ar+50%He+0,015%N ₂ [9]	22
Slika 13. Uzorak 1 zaštićen čistim argonom [6]	26
Slika 14. Uzorak 2 zaštićen argonom + 2.5% vodika [6].....	27
Slika 15. Uzorak 3 zaštićen argonom + 5% vodika [6].....	27
Slika 16. Uzorak 4 zaštićen argonom + 7.5% vodika [6].....	28
Slika 17. Robotska stanica Varstroj VRC-1G MIG + 1G TIG / 1dm [11]	29
Slika 18. Robotski manipulator Almega AX-V6	30
Slika 19. Privjesak za učenje (ljevo), upravljačka jedinica Almega AX-C (sredina), operatorski panel (desno)	31
Slika 20. Izgled elektrode kod istosmjerne struje [5]	32
Slika 21. Prikaz stezanja uzorka.....	34
Slika 22. Prikaz procesa navarivanja.....	35
Slika 23. CNC stroj za plazma rezanje	38
Slika 24. Phoenix Alpha Grinder Polisher	39
Slika 25. Usporedba makrouzorka navarenog pod zaštitom čistog Ar (1,2,3) i makrouzorka navarenog pod zaštitom Ar + 5 % (4, 5, 6)	43
Slika 26. Grafički prikaz ovisnosti penetracije o jačini struje.....	44
Slika 27. Grafički prikaz ovisnosti širine navara o jačini struje.....	44

Popis tablica

Tablica 1. Netaljive elektrode [1].....	4
Tablica 2. Jakost struje za određene promjere [4].....	5
Tablica 3. Neke od karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [3]	6
Tablica 4. Uobičajene vrijednosti parametara za TIG [1]	8
Tablica 5. Preporučeni zaštitni plinovi prilikom zavarivanja pojedinih metala [6]	10
Tablica 6. Standardni zaštitni plinovi i njihova primjena kod TIG zavarivanja [2].....	11
Tablica 7. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitni plinova, prema [8]	17
Tablica 8. Svojstva plinskih komponenti [10]	23
Tablica 9. Klasifikacija plinskih postupaka za postupke zavarivanja i srodnih postupka [10]	24
Tablica 10. Tolerancija komponenti u mješavini	25
Tablica 11. Izgled i dimenzije mikroizbruska uzorka za struju 50 A.....	28
Tablica 12. Mehanička svojstva niskougličnog austenitnog čelika (ELC) [12]	33
Tablica 13. Kemijska analiza AISI 304 ploče debljine 5 mm [13]	33
Tablica 14. Fizikalna svojstva za AISI 304.....	33
Tablica 15. Parametri navarivanja.....	35
Uporabom različitih zaštitnih plinova razlika u izgledu navara se može primjetiti golim okom. Prisustvom vodika u smjesi zaštitnih plinova kao plina dobre toplinske vodljivosti uzrokuje povećan unos topline što za posljedicu ima veću širinu navara kod jednakih jačina struje.	
Tablice 16, 17 i 18 Prikazuju parametre i izgled navara za različite jačine struje.	36
Tablica 17. Parametri i izgled navara za jačinu struje od 80 A.....	36
Tablica 18. Parametri i izgled navara za jačinu struje od 95 A.....	37
Tablica 19. Parametri i izgled navara za jačinu struje od 110 A.....	37
Tablica 20. Prikaz unosa topline po uzorku	41
Tablica 21. Izgled makrouzoraka kod kojih je kao zaštitni plin korišten čisti Ar.....	41
Tablica 22. Izgled makrouzoraka kod kojih je kao zaštitni plin korištena mješavina argona s udjelom od 5 % vodika.....	42

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
E	GPa	Modul elastičnosti
d	mm	Promjer elektrode
h	mm	Visina ploče
I	A	Jakost struje
m	kg	Masa
R	Ω	Električni otpor
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Granica razvlačenja
T	K	Temperatura taljenja
T_v	K	Temperatura vrenja
U	V	Napon luka
Q	kJ/mm	Unos topline
Q	l/min	Protok plina
v_t	kg/h	Brzina taljenja
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja
α	10 ⁻⁶ /K	Toplinsko rastezanje
λ	W/mK	Toplinska vodljivost

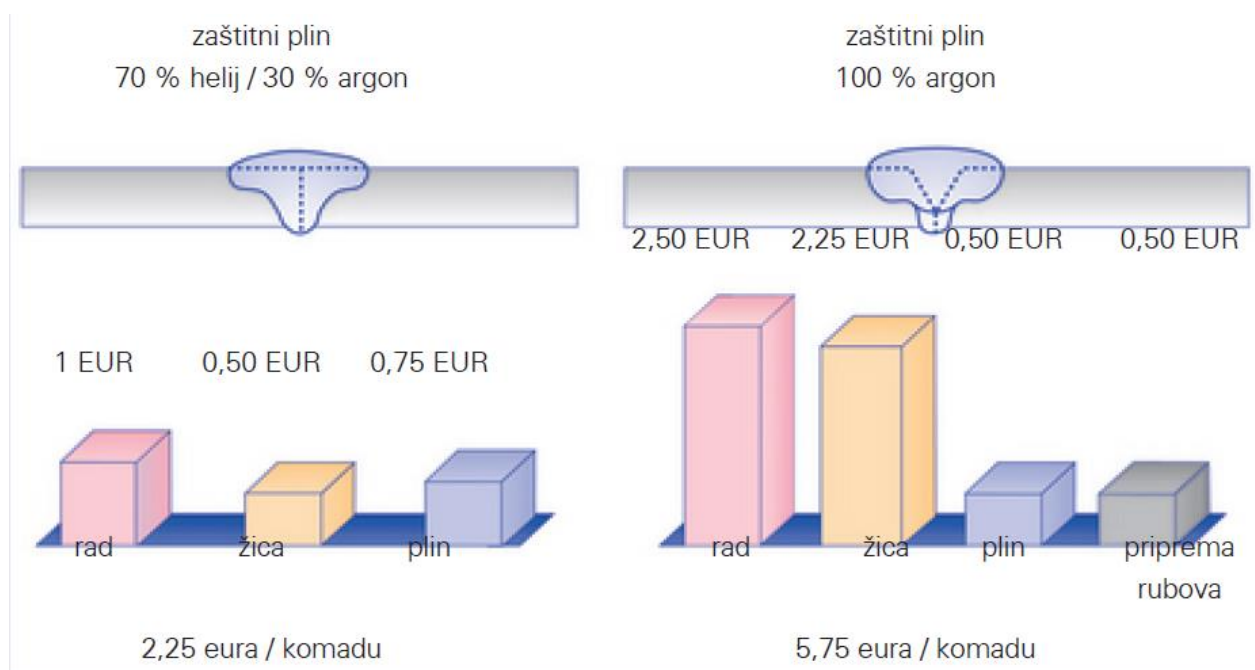
Sažetak

Tema ovog završnog rada je „ZAŠTITNI PLINOVI PRI TIG ZAVARIVANJU“. Rad se sastoji se od dva dijela teoretskog i praktičnog. U teoretskom dijelu opisan je TIG postupak, izbor odgovarajućih parametara za TIG postupak i odgovarajuće opreme. Dan je pregled inertnih plinova i njihovih mješavina koje se koriste za ovaj postupak zavarivanja kao i mogućnosti njihove primjene u zaštiti korijena. Prikazani su primjeri korištenja različitih plinova iz ranijih ispitivanja. Opisana je norma HRN EN ISO 14175:2008. U eksperimentalnom dijelu uspoređivane su karakteristike zavarenog spoja načinjenog TIG postupkom na visokolegiranom nehrđajućem čeliku i to u zaštiti argona i mješavine argona s udjelom 5% vodika. Proučavana je geometrija zavora za pojedine razine unosa topline.

Ključne riječi: TIG; zaštitni plinovi; HRN EN ISO 14175:2008

1. Uvod

TIG zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina je postupak spajanja metala taljenjem i skrućivanjem osnovnog i dodatnog materijala (ako se on koristi). Za ovaj postupak je karakteristično da se može zavarivati sa ili bez dodatnog materijala. TIG je skraćenica od engleske riječi „Tungsten inert gas“. Tungsten je engleski naziv za volfram, a označava netaljivu elektrodu koja se koristi u ovom postupku (može biti legirana i ne legirana). Razvoj TIG-a jepočeo oko 1941. godine razvojem od elektrolučnog zavarivanja ugljenom elektrodom koja se do tad koristila, a razvoj traje i danas. Zaštitni inertni plinovi koriste se prvenstveno radi zaštite zavara ali i radi zaštite elektrode jer korištenje aktivnih plinova u ovom postupku izazvalo bi oksidaciju elektrode. Obično se kao zaštitni plin koristi argon i helij čist ili kao mješavina. Pravilnim izborom zaštitnih plinova povećavamo kvalitetu zavara i bitno utječemo na troškove zavarivanja i troškove naknadne obrade kao što je okvirno prikazano na slici 1. [1]



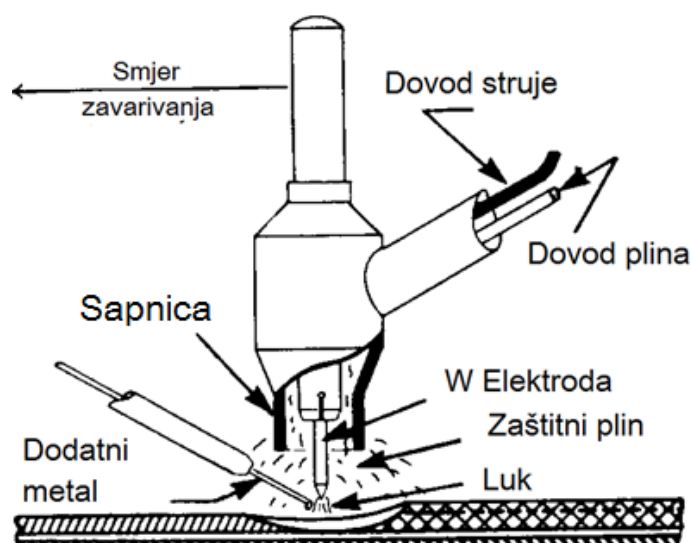
Slika 1. Usporedba troškova [2]

2. TIG zavarivanje

2.1 Općenito

TIG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u inertnom plinu (Ar ili He) ili rjeđe u plinskim mješavinama. Skraćenica imena postupka dolazi od naziva "Tungsten Inert Gas", naziv koji se koristi u njemačkoj literaturi je WIG (Wolfram Inert Gas), a u engleskoj literaturi je to GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). Početak razvoja TIG-a počinje u vrijeme II. svjetskog rata u vrijeme kad se ubrzano razvijaju i usavršavaju i drugi postupci zavarivanja. Kod TIG postupka električni luk se uspostavlja između netaljive elektrode i osnovnog materijala. Zona utjecaja topline, rastaljeni osnovni materijal i volframova elektroda zaštićeni su atmosferom inertnog plina. Proces se izvodi s dodatnim materijalom ili bez njega. Glavne prednosti TIG zavarivanja su: velika kvaliteta spoja, nema rasprskavanja, dodatni materijal se tali u talini, metal se ne prenosi kroz električni luk, moguća primjena bez dodatnog materijala, odlična kontrola (oblika) korijena, precizna kontrola parametara zavarivanja, primjenjiv na veliki broj osnovnih metala, dobra kontrola izvora topline i načina uvođenja dodatnog metala, nema troske, moguć bilo koji položaj zavarivanja.

Glavni nedostaci kod TIG-a su: manja produktivnost, zahtjeva se posebna osposobljenost zavarivača, teškoće u zaštiti zavarenog spoja pri zavarivanju na otvorenom. [1]



Slika 2. Shematski prikaz elektrolučnog zavarivanja netaljivom elektrodom [1]

2.2 Elektrode za TIG zavarivanje

Kod TIG-a riječ tungsten odnosi se na čisti element volframa i njegovih raznih legura koje se koriste kao elektrode. Volframove elektrode su nepotrošne ako se proces zavarivanja inertnim plinom odvija pravilno, jer se one ne mogu rastaliti i prenijeti u zavar na temperaturama zavarivanja TIG-om. Zadaća volframovih elektroda je da prenose električnim lukom toplinu potrebnu za zavarivanje. Točka tališta volframa je 3410 °C (6170 °F). Dostizanje tako visoke temperature omogućuje mu elektrootporno zagrijavanje, a da nema značajnog efekta hlađenja vrha elektrode. U biti vrh elektrode je znatno hladniji nego onaj dio elektrode između vrha elektrode i čahure. [3]

2.2.1 Podjela netaljivih elektroda

Za TIG postupak postoje četiri vrste elektroda:

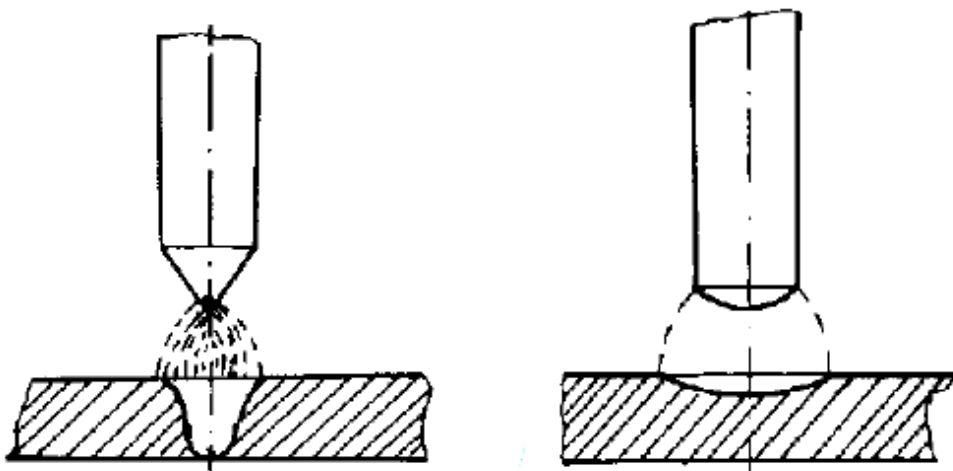
- Elektrode od čistog volframa (W)- temperatura taljenja je 3410 °C, koje se proizvode sinteriranjem praška volframa, čistoće min. 99,5% jer veći udio nečistoća uzrokuje brzo trošenje elektrode.
- Elektrode od volframa sa dodatkom 0,9 do 4,2 % oksida torijuma (W-Th), koji omogućava lakši prijenos elektrona, što osigurava lakše uspostavljanje i održavanje električnog luka. Osim toga ovim elektrodama se povećava stabilnost luka na nižim temperaturama i osigurava znatno duži radni vijek elektrode.
- Volframove elektrode sa 0,3 do 0,9 % cirkonijum oksida. Po svojstvima i cijeni ove elektrode su između dvije navedene grupe. Primjenjuju se samo kod izmjenične struje, odnosno za zavarivanje aluminija i lakih legura
- Volframove elektrode sa 0,9% do 1,2 % lantan oksida. Koriste se za plazma zavarivanje jer imaju duži vijek od ostalih varijanti [1]

Tablica 1. Netaljive elektrode [1]

Materijal	Dodatci[%]	Simbol	Boja	Opis
Volfram	<0,2	WP	Zelena	Malo ispravljanje i dobra stabilnost kod izmjenične struje
Volfram sa torijum oksidom	0,3-0,5 ThO ₂ 0,8-1,2 ThO ₂ 1,7-2,2 ThO ₂ 2,8-3,2 ThO ₂ 3,8-4,2 ThO ₂	WT4 WT 10 WT 20 WT 30 WT 40	Plava Žuta Crvena Ljubičasta Narandžasta	Povećanjem sadržaja ThO ₂ Povećava se vijek, dozvoljena jačina struje i popravljja start. Th je radioaktivan
Volfram sa cirkonijum oksidom	0,15–0,5 ZrO ₂ 0,7-0,9 ZrO ₂	WZ 4 WZ 8	Smeđa Bijela	Smanjeni uključci volframa u zavaru (koristi se za nuklearne posude)
Volfram sa lantan oksidom	0,9- 1,2 LaO ₂	WL 10	Crna	Duži vijek od WT elektroda (za plazma zavarivanje)

2.2.2 Oblik elektrode

Na zavar ne utječe samo vrsta elektrode nego i njezin oblik. Oblik elektrode utječe također i na stabilnost luka i dubinu zavora. Volframove elektrode nisu potpuno otporne na trošenje i oblik njihovog vrha ovisi o izvoru struje, kod izmjenične struje oblik vrha elektrode će biti sferni i kod takvih elektroda je gustoća struje manja, dok kod istosmjerne struje pojavljuje se konusni vrh elektrode jer ona koristi struju veće gustoće. [1]



Slika 3. Utjecaj oblika elektrode na izgled zavora [1]

Također i promjer elektrode ovisi o jačini struje, kad je struja minimalna promjer bi trebao biti minimalan kako bi luk bio stabilan. Kod velikih struja potreban je veći promjer da ne bi došlo do pregrijavanja elektrode te da ne bi došlo da njenog taljenja [4]

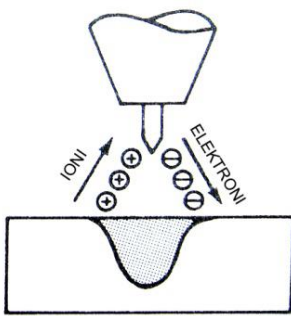
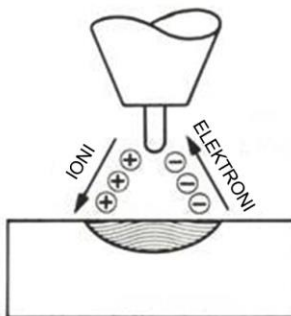
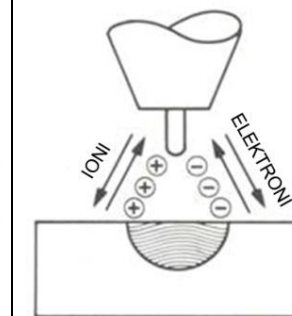
Tablica 2. Jakost struje za određene promjere [4]

Promjer elektrode [mm]	Maksimalna radna struja	
	Istosmjerna struja [A]	Izmjenična struja [A]
1,6	60-150	60-125
2,4	170-250	120-210
3,2	225-330	150-250
4,0	350-480	240-350
4,8	500-675	330-460

2.3 Izvori struje

Kod TIG postupka koristi se izmjenična struja (AC) ili istosmjerna struja (DC), izbor struje ovisan je o materijalu koji se zavaruje. Izvori struje imaju strmu karakteristiku. To znači da se struja održava tijekom zavarivanja na približno jednakim vrijednostima, bez obzira na to kako se mijenja napon (visina električnog luka koju zavarivač sam odabire). Uređaj za proizvodnju visokofrekventne električne struje je dodatni mali transformator, koji proizvodi električnu struju visokog napona od nekoliko tisuća volti, te se ugrađuje na izvore izmjenične i istosmjerne struje zavarivanja. Najčešće se koriste tranzistorski izvori struje koji omogućuju zavarivanje u ciklusu (start, pulsirajuće jačanje struje i zaustavljanje luka). Izborom različitih izvora struje mogu se dobiti različiti oblici zavara, različite penetracije i širine zavara (tablica 3).[3]

Tablica 3. Neke od karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [3]

Vrsta struje	DC	DC	AC
Polaritet elektrode	Negativan	Pozitivan	
Tok elektrona i iona			
Čišćenje oksida	Ne	DA	Da- svakih pola ciklusa jednom
Raspodjela topline između elektrode i radnog komada	70 % na radnom komadu 30 % na kraju elektrode	30 % na radnom komadu 70 % na kraju elektrode	70 % na radnom komadu 30 % na kraju elektrode
Penetracija	Dobra (uska)	Plitka (široka)	Srednja
Kapacitet elektrode	Odličan npr. elektroda Ø 3,2 mm 400 A	Mali npr. elektroda Ø 6,4 mm 120 A	Dobar npr. elektroda Ø 3,2 mm 255 A

2.3.1 Istosmjerna struja

Kod istosmjernih izvora struje elektroda može biti spojena na pozitivni ili negativni pol. Za većinu materijala se koristi elektroda spojena na negativnom polu izvora struje, jer na taj način se dobivaju uža zavari s većom penetracijom. Kod ovakvog načina spajanja elektrode elektroni putuju od negativne elektrode prema pozitivnom radnom komadu, a pozitivni ioni od pozitivnog radnog komada prema negativnoj elektrodi. Budući da elektroni imaju veću kinetičku energiju od iona i brže se zagrijava mjesto zavarivanja na komadu, a manje elektroda pa je manje toplinsko opterećenje na elektrodi. Toplina je raspoređena znatno više na radnom komadu i omjer raspodjele iznosi 70 % na radnom komadu, a na elektrodi je ona tek 30 %. Kod ovakvog načina zavarivanja karakteristična je zašiljena elektroda kod koje je koncentrirani električni luk, što utječe na penetraciju, a luk je i stabilniji za manje jakosti struje.

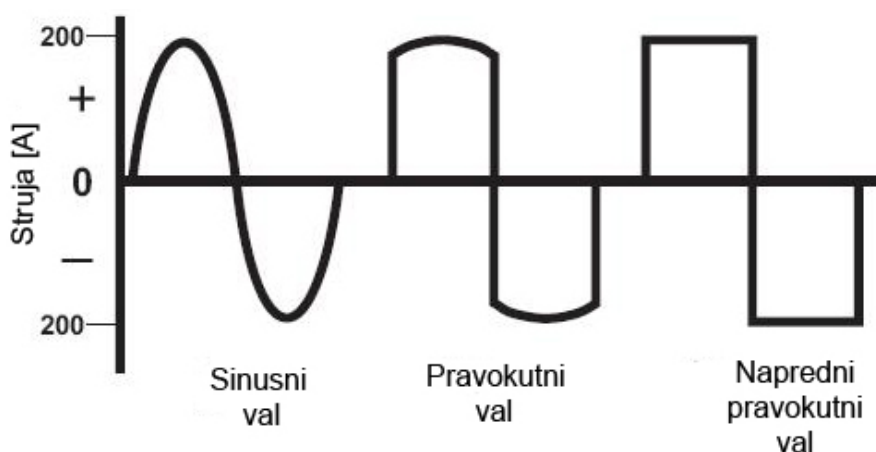
Spajanje elektrode na pozitivni pol izvora struje koristi se najčešće kod materijala sa tvrdim oksidima kao što je Al i Mg. Zbog izbijanja elektrona iz površinskih oksida radnog komada oksidi se raspadaju, te se ova pojava zove katodno čišćenje.

Kako elektroni bombardiraju elektrodu ona se jako zagrijava, zato je kod pozitivne elektrode potreban veći promjer da bi se smanjilo elektrootporno zagrijavanje.

Kod većeg promjera elektrode, a manje jakosti struje dolazi do smanjenja stabilnosti električnog luka. Kapacitet elektrode na plus polu je jedna desetina onog na minus polu. Za vrh elektrode na pozitivnom polu je karakteristično da je sfernog oblika.[3]

2.3.2 Izmjenična struja

Izmjenična struja je struja čiji tok elektrona mijenja smjer (pozitivan i negativan) u vremenu. Cilj je postići što bržu promjenu struje, da se dobije što veća iskoristivost uređaja zavarivanje, budući da struja teče u valovima, tj. titra, a na vrhovima je najveća struja, te se želi postići što duže zadržavanje na tim vrhovima. Na slici 4 je prikazan izgled normalnih valova i izgled valova kojima se teži.



Slika 4. Usporedba tri vrste valova izmjenične struje [5]

Nedostatak električnog luka izmjenične struje je u tome što kod mijenjanja pravca gibanja čestica dolazi do teoretskih „gašenja“ i „paljenja“ električnog luka, što ga čini nestabilnim. Zbog toga se u izvor struje dodaje uređaj koji proizvodi visokonaponsku visokofrekventnu električnu struju, koja daje snažne izboje u svakom nultom periodu i poboljšava stabilnost električnog luka.

Visoka frekvencija (do 1 MHz) služi za ponovnu uspostavu električnog luka, te poboljšava njegovu usmjerenost, dok električni luk vrši čišćenje oksida i pretajivanje. [3]

Korištenjem izmjenične struje kod TIG zavarivanja dubina i širina zavora je između negativnog i pozitivnog polariteta elektrode kod jednosmjerne struje.

U novijim izvorima struje sve češće se uvode kondenzatorske baterije koja povećavaju pozitivne poluperiode. [1]

2.4 Parametri kod TIG-a

Izbor parametara zavarivanja direktno određuje kvalitetu zavora, pa je zato potrebno pažljivo izvršiti njihov odabir. U tablici 4 su prikazane uobičajene vrijednosti parametara kod TIG-a.

Tablica 4. Uobičajene vrijednosti parametara za TIG [1]

Parametar	Opseg
Promjer elektrode	0,5 – 6,3 mm
Jačina struje	10 – 400 A
Napon luka	10- 30 V
Protok zaštitnog plina (argon)	5 – 15 l/min
Brzina zavarivanja	10 – 30 (80) cm / min
Promjer dodatnog materijala	2 – 5 mm
Brzina topljenja	1,8 – 5,4 kg/h

Izbor promjera elektrode je usko vezan za materijal od kojeg je elektroda napravljena te jačini struje. [1]

Jakost struje ovisi o debljini osnovnog materijala, obliku i dimenzijama spoja te položaju spoja, područje jakosti struja je od 10A – 400A. Jakost struje se povećava kod zavarivanja nehrđajućih čelika za 30 A za svaki milimetar debljine lima, kod aluminija za oko 45 A za svaki milimetar debljine lima.

Polaritet ovisi o materijalu koji se zavaruje. Al i Mg i njihove legure zavaruju se izmjeničnom strujom, iako se mogu i istosmjernom (ali ne tako uspješno kao izmjeničnom) kao kad je elektroda na plus polu. Ostali materijali zavaruju izmjeničnom strujom ili kad je elektroda na minus polu.

Sastavi protok zaštitnog plina ovisi o vrsti materijala koji se zavaruje, jakosti struje zavarivanja, tehnici zavarivanja i mjestu rada. Protok zaštitnog plina kreće se najčešće od 5 do 15 l/min.

Kod zavarivanja Al i Mg količina zaštitnog plina argona iznosi oko 6 l/min na 100 A, a povećanjem jakosti struje za svakih daljnjih 100 A iznosi otprilike 4 l/min više.

Potrebno je biti posebno oprezan prilikom namještanja protoka zaštitnog plina, jer prevelika količina zaštitnog plina stvara nemirno strujanje, te vrtloženje izlazećeg plina, što stvara unošenje zraka, a time i štetnih plinova u talinu zavara, koji negativno utječu na mehanička svojstva zavara. Ako se pak zavaruje s premalom količinom zaštitnog plina, plin se lako otklanja s mjesta zavara, te time mjesto zavara nije dovoljno zaštićeno, što također rezultira lošim mehaničkim svojstvima zavara. [6]

3. Zaštitni plinovi

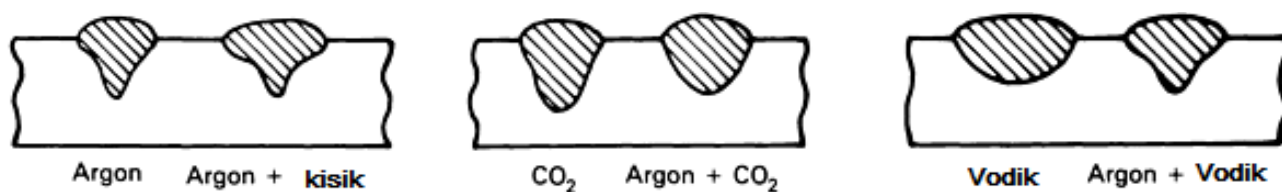
Svi postupci zavarivanja koriste neki način zaštite kako bi zaštitili zonu taljenja od djelovanja atmosfere. Bez te zaštite talina bi reagirala sa plinovima iz atmosfere i zavar bi postao porozan, a i otežano bi bilo uspostavljanje električnog luka. Važnost zaštite od atmosferskog djelovanja očituje se u činjenici da se kod gotovo svih elektrolučnih postupaka spominje način zaštite od atmosfere u imenu postupka. Inertni plin koji se koristi kod TIG-a je takav plin koji ne reagira s talinom zavara. Među takve plinove spadaju Ar i He, a plinovi koji sudjeluju u kemijskom procesu s talinom nazivaju se aktivni zaštitni plinovi, to su npr. CO₂ i O₂. Argon s malim količinama O₂ ili CO₂ je također aktivan. Argon, helij, vodik i dušik su plinovi koji se uglavnom koriste kod TIG zavarivanja kao zaštitni plinovi za zavarivanje i za zaštitu korijena zavarenog spoja. U Europi se uglavnom koristi argon i mješavine argona i dušika te mješavine argona i vodika, zbog visoke cijene helija. Primarna uloga inertnih zaštitnih plinova kod TIG-a je zaštita zavarenog spoja od okoline, osim toga izborom zaštitnih plinova u zavisnosti od parametara zavarivanja možemo utjecati i na geometriju zavara, penetraciju i unos topline. Optimalnim izborom zaštitnog plina ovisno o parametrima i vrsti zavarivanja može se poboljšati kvaliteta zavara i smanjiti troškovi zavarivanja. Prilikom zavarivanja pojedinih materijala neki plinovi bolje utječu na kvalitetu zavara od ostalih, u tablici 5 su prikazani optimalni plinovi za pojedinu vrstu metala. [7]

Tablica 5. Preporučeni zaštitni plinovi prilikom zavarivanja pojedinih metala [6]

Plin/ Materijal koji zavarujemo	Ne legirani i niskolegirani čelici	Nehrđajući čelici	Niklove legure	Bakrene legure	Aluminijske legure
Ar	x	x	x	x	x
Ar/H ₂		x	x		
Ar/He			x	x	x
He				x	x

Najvažnije funkcije zaštitnog plina prilikom zavarivanja su: [6]

- Zaštita rastaljenog metala od plinova iz atmosfere (kisika, dušika)
- Podržavanje plazme električnog luka
- Povećanje stabilnosti električnog luka
- Utjecaj na oblik i dubinu penetracije zavora
- Utjecaj na estetski izgled samog zavora
- Utjecaj na razinu para prilikom zavarivanja



Slika 5. Utjecaj plinova i plinskih mješavina na izgled zavora

Tablica 6. Standardni zaštitni plinovi i njihova primjena kod TIG zavarivanja [2]

Proizvod	Tipske komponente mješavina s Ar	Grupa po HRN EN439	Primjena
Argon		I1	Visoko legirani i nelegirani čelici, aluminijski materijali, ostali ne željezni metali
Inoxmix H	2% H ₂ 5% H ₂ 7.5% H ₂	R1 R1 R1	Austenitni Cr-Ni čelici (5 % i 7,5 % H ₂ potpuno mehanizirani)
Inoxmix N	1,25% N ₂ 2,5% N ₂ 15% He, 1,25% N ₂	SI1 SI1 SI3	Duplex, super-duplex, potpuno austenitni Cr-Ni čelici
Helij 4.6		I2	Aluminij (minus pol-zavarivanje), čelici (orbitalno zavarivanje)
Alumix He	30% He 50% He 70% He 90% He	I3 I3 I3 I3	Aluminij, bakar nikal, čelici (orbitalno zavarivanje), TIG zavarivanje istosmjernom strujom
Alumix N	0,015% N ₂	SI1	Aluminijski materijali i legure
Alumix He N	15% He, 0,015% N ₂ 30% He, 0,015% N ₂ 50% He, 0,015% N ₂	SI3 SI3 SI3	Aluminijski materijali i legure
Argon 4.8		I1	Materijali osjetljivi na plinove kao što su titan, niob, molibden, tantal, zaštita krojena
Formir plin (N ₂ - H ₂) mješavine	5% H ₂ 10% H ₂ 15% H ₂	F2	zaštita krojena kod visoko i nisko legiranih čelika

3.1 Fizikalne karakteristike zaštitnog plina

Najznačajnije fizikalne karakteristike zaštitnih plinova su:

- Ionizacijski potencijal
- Toplinska vodljivost
- Disocijacija i rekombinacija
- Čistoća plina
- Gustoća plina

Ionizacijski potencijal je energija, izražena u elektron voltima (eV), potrebna za uzimanje jednog elektrona od atoma plina – pretvarajući ga u ion. Vrijednost potencijala ionizacije se smanjuje kako se molekularna masa plina povećava. Ionizacijski potencijal ima također veliki utjecaj na paljenje i na stabilnost električnog luka. [6]

Toplinska vodljivost pokazuje kako pojedini plin može provoditi toplinu. Utječe na radijalni gubitak topline od centra prema rubovima električnog luka, kao i na prijenos topline između plazme i rastaljenog metala. Prema tome, plin koji ima veću toplinsku vodljivost vodi toplinu prema van iz jezgre, što rezultira širom jezgrom električnog luka, te višom temperaturom jezgre električnog luka. [6]

Disocijacija i rekombinacija zaštitni plinovi čije su molekule građene od više atoma (vodik, kisik) prilikom zagrijavanja na visoke temperature unutar električnog luka, se razbijaju, ili disociraju u atome od kojih su građene molekule. Atomi su nakon toga barem djelomično ionizirani, te tvore slobodne elektrone i protok struje. Kada disocirani plin dođe u kontakt s relativno hladnom površinom radnog komada, atomi se rekombiniraju i otpuste toplinu. Ta toplina rekombinacije djeluje na plin da se ponaša kao da ima višu toplinsku vodljivost. [6]

Čistoća plina ovisno o tome koji metal se zavaruje i kojom tehnologijom zavarivanja, vrlo male količine nečistoća u zaštitnome plinu mogu značajno utjecati na brzinu zavarivanja, ponašanje taline, skrućivanje zavara i poroznost zavara. Neki metali, kao npr. ugljični čelik imaju visoke tolerancije na čistoću plina, dok npr. zavarivanje titana traži zaštitne plinove vrlo visoke čistoće, budući da oni imaju vrlo niske tolerancije na čistoću zaštitnog plina. [6]

Gustoća plina je jedan od glavnih faktora koji utječu na efikasnost zaštitnog plina. Načelno, da bi osigurali adekvatnu zaštitu taline zavora, plinovi teži od zraka, kao što su argon i ugljični dioksid, trebaju manji protok plina prilikom zavarivanja, nego što je potrebno kod lakših plinova, kao što je npr. helij.

3.2 Opis pojedinačnih zaštitnih plinova

3.2.1 Argon

Argon je inertni jednoatomni plin. Dobiva se iz atmosfere odvajanjem od tekućeg zraka. Stupanj čistoće argona potreban kod zavarivanja TIG postupkom za većinu materijala je 99,95 %, osim kod vatrootpornih i reaktivnih metala (titan, molibden i tantal) za koje je potrebna minimalna čistoća 99,997%. Ovakvi materijali se najčešće zavaruju u komorama iz kojih su istisnuti svi tragovi zraka. Argon se češće u praksi upotrebljava od helija zbog sljedećih prednosti:

- veća gustoća
- niža cijena i veća dostupnost
- potreban manji protok
- veći ionizacijski potencijal te je lakše uspostavljanje luka

Manja penetracija omogućuje zavarivanje tanjih dijelova jer je smanjena mogućnost protajivanja. [3]

3.2.2 Helij

Jednoatomni inertni plin, male atomske mase i male gustoće (otprilike 14 % gustoće zraka). Cijena mu je mnogo veća nego kod argona zbog čega se u Europi gotovo i ne koristi. Zbog malog volumnog udjela u atmosferi dobiva se separacijom iz prirodnog plina u kojem se smatra nečistoćom. Koristi se u zavarivanju gdje je potreban veliki unos topline čime omogućava veću žitkost taline, veću dubinu provara i veću brzinu zavarivanja. Izrazito je koristan kod zavarivanja aluminija i magnezija koji su „netolerantni“ na uključke oksida, primjenjuje se i u plinskim mješavinama pri zavarivanju korozijski postojanih čelika.

Ima izrazito stabilan električni luk te se primjenjuje kod zavarivanja visokim gustoćama struje. Postotak čistoće helija kod zavarivanja preciziran je na minimalno 99,99%.

Za jednaku jačinu struje i dužinu električnog luka helij prenosi više topline na radni komad i ima širi električni luk nego argon. Također helij se koristi za zavarivanje debljih dijelova. Kod potrebne za karakteristikama koje su između karakteristika zavarivanja helijem i zavarivanja argonom koriste se mješavine Ar-He. [3]

3.2.3 Vodik

Vodik je plin bez boje, mirisa i okusa. Ima jako visoku toplinsku vodljivost, te se toplina može veoma brzo prenijeti od zavara električnim lukom. Koristi se kao mješavina u visoko temperaturnim operacijama, kao što je zavarivanje nehrđajućih austenitnih čelika i niklovih legura. Obično se miješa sa argonom. Potrebno je biti posebno oprezan prilikom zavarivanja s dodatkom vodika, budući da je moguća pojava vodikove poroznosti u zavaru. Zato se izbjegava zavarivanje u više prolaza i količina vodika u mješavini najviše iznosi do 15 %.

3.2.4 Dušik

Ima veću toplinsku vodljivost od argona. Upotrebljava se često u kombinaciji s argonom (do 3 % dušika) i to obično kod zavarivanja metala koji imaju visoku toplinsku vodljivost (bakar). Međutim mješavine dušika se upotrebljavaju za zavarivanje samo nekih metala kao što su duplex čelici (stvaranje austenitne strukture dodatkom dušika), austenitni čelici i niklove legure, jer kod ostalih metala izrazito povećava mogućnost stvaranja pukotina.

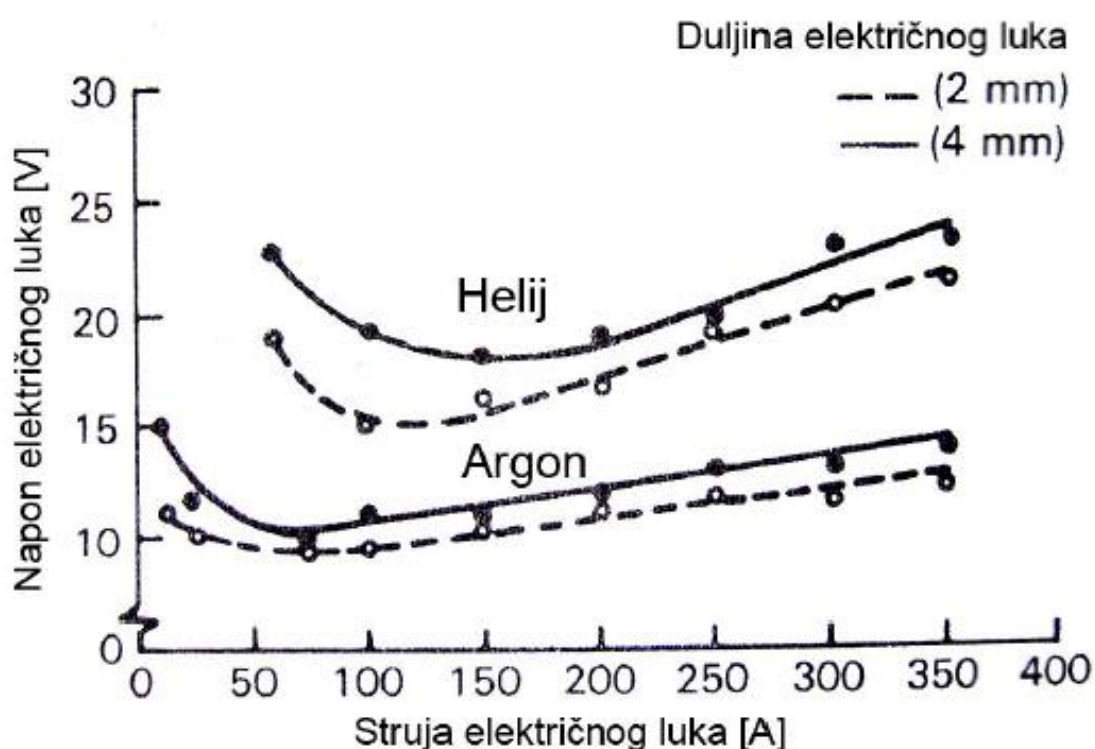
3.3 Karakteristike argona i helija

Glavni faktor učinkovitosti djelovanja plinova je njihova gustoća. Gustoća argona je približno za trećinu veća od gustoće zraka, a približno za desetinu veća od gustoće helija. Argon nakon izlazaka iz sapnice formira omotač preko područja zavara i na taj način ga štiti od oksidacije i drugih nepovoljni utjecaja.

Upotreba helija zahtjeva veću količinu zaštitnog plina kod jednake primjene s argonom. Primjeri iz prakse su pokazali da za ekvivalentnu učinkovitost zaštite potreban je dva do tri puta veći protok helija nego kad iste primjene s argonom.

Važna karakteristika mješavina plinova argona i helija je odnos napon-struja na elektrodi u argonu i u heliju. Za sve struje za ekvivalentnu dužinu luka, dobiveni napon kod helija je značajno veći nego onaj kod argona.

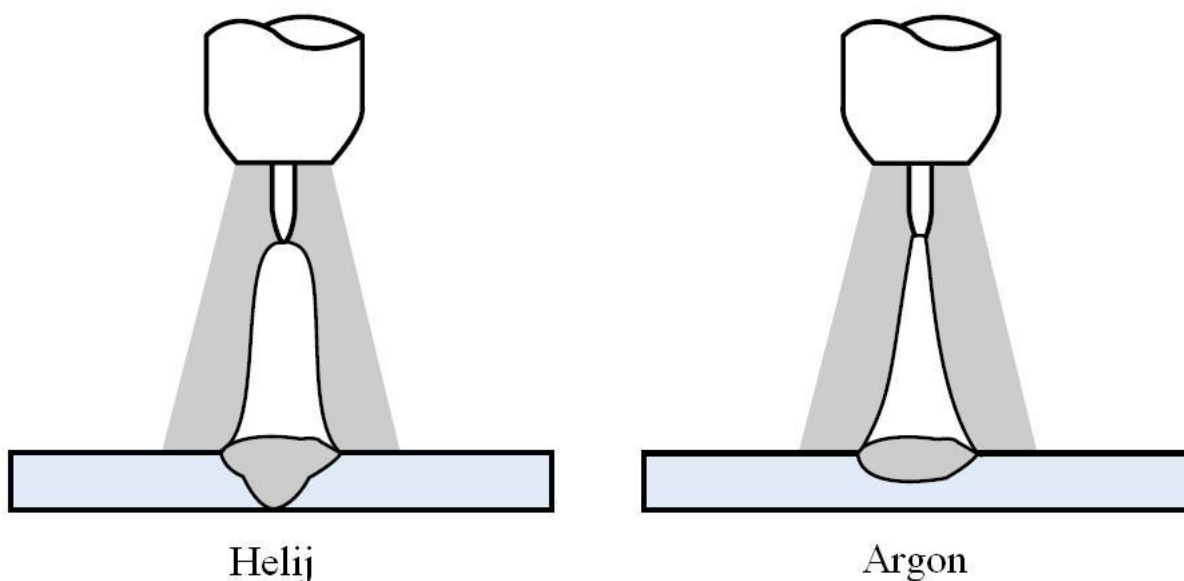
Na slici 6. prikazan je odnos između struje električnog luka i napona električnog luka, prilikom zavarivanja aluminija TIG postupkom s argonom odnosno helijem. Iz slike je vidljivo da je napon električnog luka prilikom zavarivanja helijem značajno veći od napona električnog luka prilikom zavarivanja argonom, a kod jednake jačine struje toplinska vodljivost kod helija je znatno veća nego od argona.



Slika 6. Veza napona i struje električnog luka u odnosu na zaštitne plinove argon i helij [3]

Veća toplinska vodljivost helij čini boljim izborom od argona kod zavarivanja debelih materijala, materijala veće toplinske vodljivosti ili materijala visoke točke tališta. [3]

Argon se češće upotrebljava kod zavarivanja nižim strujama zato što pri nižim strujama argon pruža bolju kontrolu električnog luka. Iz slike 6 je vidljivo da kod argona ispod struja od 50 A daljnjim smanjenjem struje dolazi do rasta napona, taj fenomen imamo i kod helija ali u rasponu struja od 150 A do 50 A, a to su struje kod kojih se obično zavaruju tanki materijali. [3]



Slika 7. Usporedba zavarivanja s helijem i argonom [6]

Sumirano, glavne razlike argona u odnosu na helij :

- Slabiji električni luk i lakša uspostava električnog luka
- Slabije toplinske vodljivosti
- Bolje čišćenje oksidnog sloja
- Manje protaljivanje kod iste jakosti struje i vrste električne struje zavarivanja
- Približno 10 puta teži od helija
- Za isti intenzitet zaštite taline potrebno je od 2 do 3 puta manje argona od helija
- Manja cijena i lakša dobavljaljivost

3.4 Plinske mješavine

Osim čistog inertnog plina argona i helija, česta je upotreba i njihove mješavine u različitim omjerima. Mješavina argona i helija kombinacija je povoljnih svojstava argona odnosno helija. [7]

Argon–vodik mješavine se koriste u specijalnim slučajevima kao što je automatsko zavarivanje cijevi nehrđajućih čelika, gdje vodik ne uzrokuje štetne učinke kao što je poroznost i vodikom uzrokovano pucanje. Povećanje brzine zavarivanja može se postići dodavanjem određenih količina vodika argonu jer se tako povećava napon luka.

Količina vodika koja se može dodati ovisi o debljini osnovnog metala i vrsti spoja za svaku pojedinačnu primjenu. Mješavine vodika se koriste za zavarivanje svih debljina nehrđajućih čelika s razmakom između dijelova od 0,25mm do 0,5mm. Argon–vodik legure su ograničene na zavarivanje nehrđajućih čelika, Ni-Cu i Ni legura.[3]

Tablica 7. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitniplinova, prema [8]

Karakteristika	Ar	Mješavina Ar/He	He
Brzina zavarivanja	Smanjena	Veća nego kod 100% Ar	Veća
Penetracija	Smanjena	Veća nego kod 100% Ar	Povećana
Čišćenje oksida	Dobro	Sličnije nego kod 100% Ar	Loše
Uspostava luka	Laka	Bolja nego kod 100 % He	Otežana
Stabilnost luka	Dobra	Bolja nego kod 100% He	Niža kod manjih struja
Oblik luka	Uži, fokusiran	uži nego kod 100% He	širi
Napon luka	Manji	srednja	Veći
Protok	Manji	Veći nego kod 100% Ar	Povećan
Cijena	niža	Veći nego kod 100% Ar	Veći nego kod 100% Ar

Plinske mješavine koriste se u različitim omjerima zaštitnih plinova za zavarivanje različitih materijala. Mješavine koje se koriste kod TIG zavarivanja za različite metale od proizvođača „Air Products“ su sljedeće:[4]

AlumaxxTM Plus se sastoji od 70% argona i 30 % helija i koristi se za zavarivanje aluminija i njegovih legura svih debljina, bakra i bakrenih legura svih debljina, nikla i niklovih legura svih debljina. Alumaxx Plus je pogodan za gotovo sve vrste TIG postupaka (ručno, automatsko, orbitalno i robotsko) zavarivanje.

Helij 75% i argon 25% se koristi za debele dijelove aluminija i aluminijskih legura, debelih dijelova bakra i bakrenih legura.

InomaxxTM TIG (airproducts) se sastoji od 68% argona, 30% helija i 2 % vodika, a koristi za zavarivanje austenitnih ne hrđajućih čelika svih debljina, nikla i niklovih legura svih debljina. Pogodan je za gotovo sve vrste TIG postupaka (ručno, automatsko, orbitalno i robotsko) zavarivanje.

Argon + 1% do 3% vodika koristi se za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika i nikla i niklovih legura.

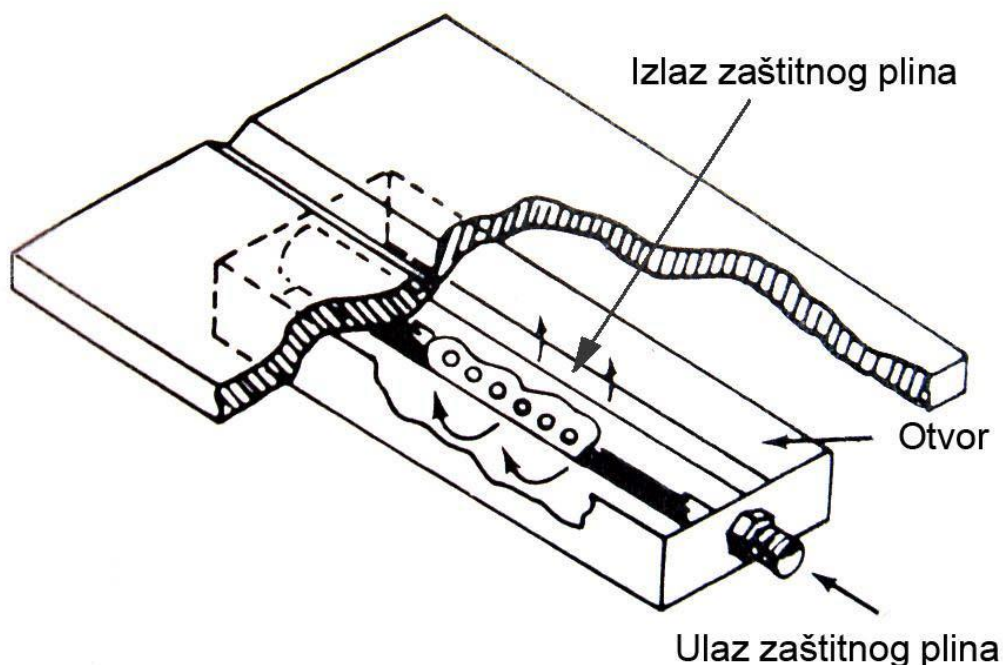
Argon +5% vodika se koristi za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika. Pogodan za gotovo sve vrste TIG postupaka (ručno, automatsko, orbitalno i robotsko) zavarivanje.

3.5 Zaštita krojena zavara

Razlog zaštite korijena zavara od mogućnost onečišćenja zavara i od raznih nečistoća koje se nalaze u atmosferi i koja nepovoljno djeluju na mehanička svojstva zavara. Također se dobiva sjajnija površina i smanjena mogućnost oksidacije. Zbog toga za dobru kvalitetu zavara potrebna je zaštita s obje strane. Zrak se odstranjuje tj, kontaminira zaštitnim plinovima i nakon što se stvori zaštitna atmosfera održava se blagi tlak unutar prostora gdje se nalazi zaštitni plin. Najčešći plinovi koji se koriste za zaštitu korijena su argon i „Formir plin“ koji se sastoji od $Ar + 1-30\% H_2$ ili $N_2 + 1-30\% H_2$. [1] Postoje razni sustavi za zaštitu korijena od utjecaja atmosfere koji se primjenjuju u proizvodnji.

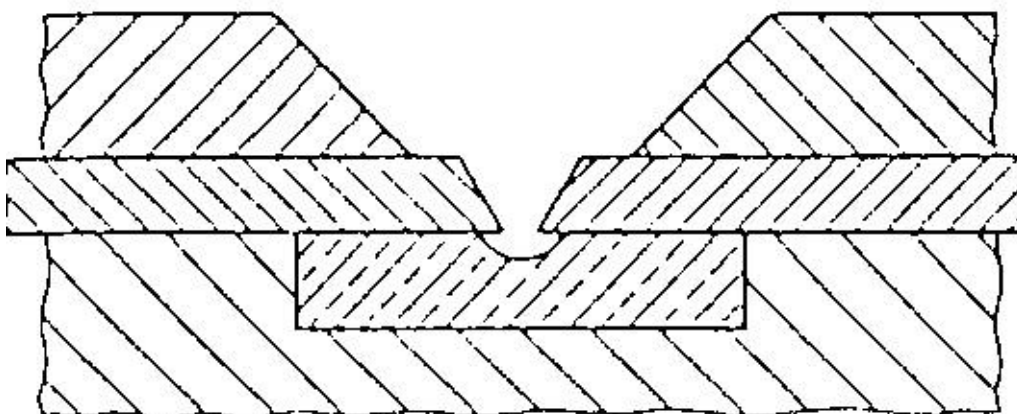
Za zaštitu korijena zavara može poslužiti naprava koja je u obliku kućišta te ima otvor s gornje strane kroz koju slobodno van struji zaštitni plin (slika 8.). Ta naprava se pričvrsti na korijen zavara kojeg se želi zaštititi od utjecaja plinova iz atmosfere, te se u nju pusti zaštitni plin, koji izlazi prema korijenu zavara, nakon toga je moguće zavarivati korijen bez opasnosti od onečišćenja.

Pri tome treba paziti da ne postoji veliki tlak zaštitnog plina u prostoru te naprave, jer bi prilikom zavarivanja zadnjih nekoliko desetaka milimetara zavora moglo doći do izbacivanja taline prema gornjoj strani zavora. Na osnovu ovog principa se može također izraditi „putujuća“ naprava koja bi tako štitila korijen zavora kod zavarivanja većih dužina zavora. [3]



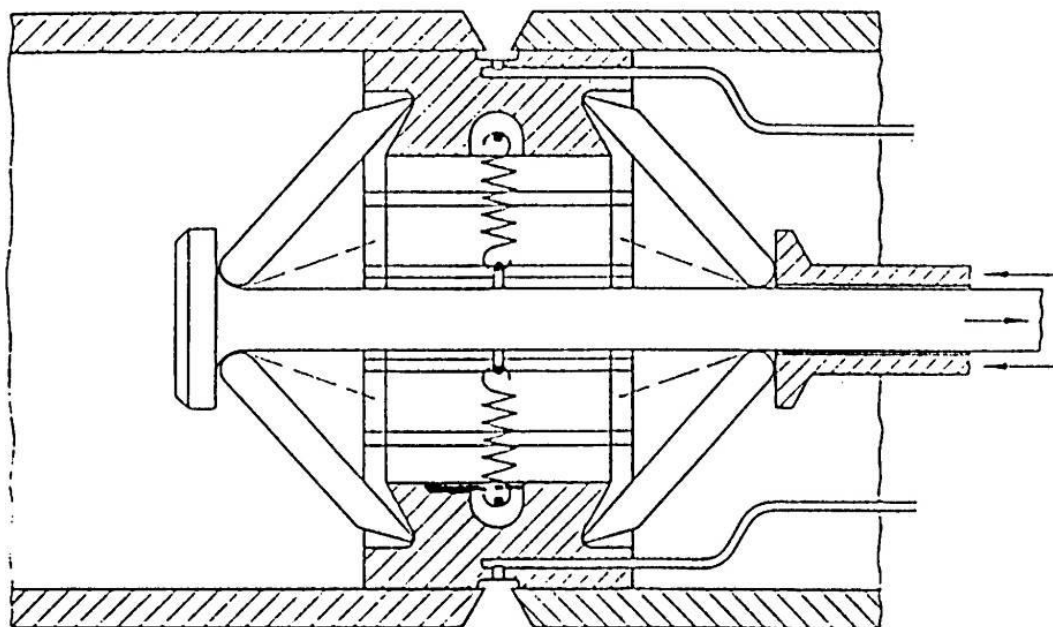
Slika 8. Zaštita korijena zavora u obliku kućišta [3]

Kako postoje različiti spojevi koje treba zavariti tako postoje i mnoga rješenja za zaštitu njihovog korijena. Često se koriste zaštitne pločice od bakra jer je bakar poznat kao dobar vodič topline.



Slika 9. Bakrena pločica - akumulirani zaštitni plin [1]

Također i kod zavarivanje cijevi postoje različita rješenja. Postoji mogućnost da se u cijev stave zatvori i kroz zatvore upuhuje zaštitni plin. Rješenje kao na slici 10 je kompliciranije i potrebna je dodatna naprava, ali je kvalitetnije i zahtjeva manju količinu zaštitnog plina.



Slika 10. Zaštita korijen kod cijevi [1]

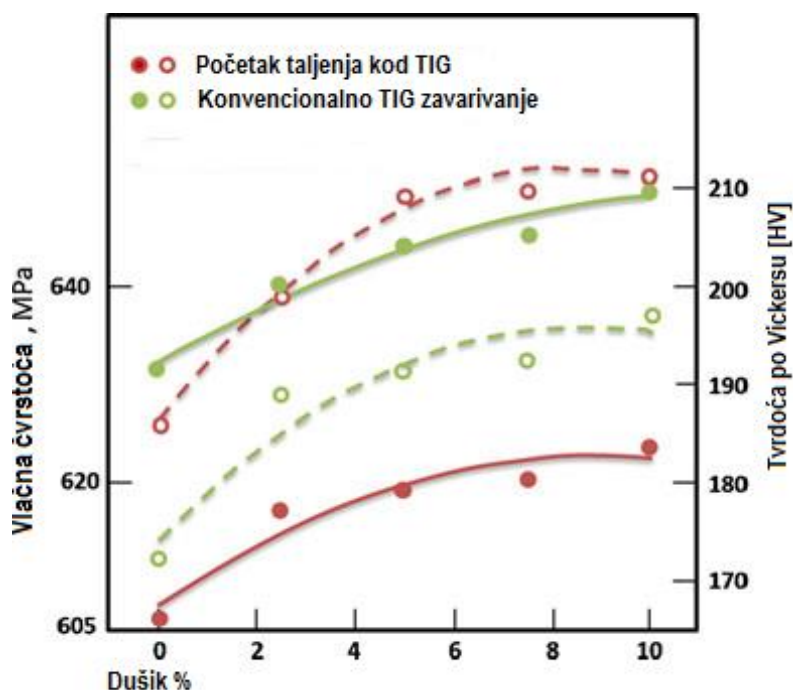
3.6 Utjecaj zaštitnih plinova na mehanička svojstva zavora

Mehanička svojstva zavora ovise o specifičnostima zaštitnog plina. Bez obzira na vrstu zaštitnih plinova njihova primjena ima značajan utjecaj na mehanička svojstva. Zaštitni plin najviše utječe na penetraciju i skrućivanje što može utjecati i na mikrostrukturu dobivenog zavora. Kod zaštitnih plinova koji su bolji vodiči topline postoji veća mogućnost da će doći do isparavanja legirajućih elemenata poput magnezija i da će to uzrokovati lošija mehanička svojstva zavora. Zaštitni plin se koristi kod zavarivanja za zaštitu zavora od utjecaja kisika i drugih nepoželjnih tvari iz atmosfere. Svojstva zavora primarno se kontroliraju parametrima zavarivanja, zaštitni plin može utjecati na čvrstoću, duktilnost, žilavost i korozijsku postojanost zavora. Za određeni dodatni materijal, što je veći oksidacijski potencijal zaštitnog plina, to je niža čvrstoća i žilavost zavora. Kod zavarivanja debelih dijelova čistim argonom kao zaštitnim plinom može se dogoditi poroznost zavora i nedostatak penetracije i fuzije. Dodavanjem helija argonu može se značajno smanjiti taj učinak.

Zbog bolje toplinske vodljivosti helija više se topline prenosi u zavar. Zbog toga je veća temperatura zavora, a time bolja penetracija i duže vrijeme skrućivanja što omogućuje zarobljenim plinovima više vremena za napuštanje zavora.

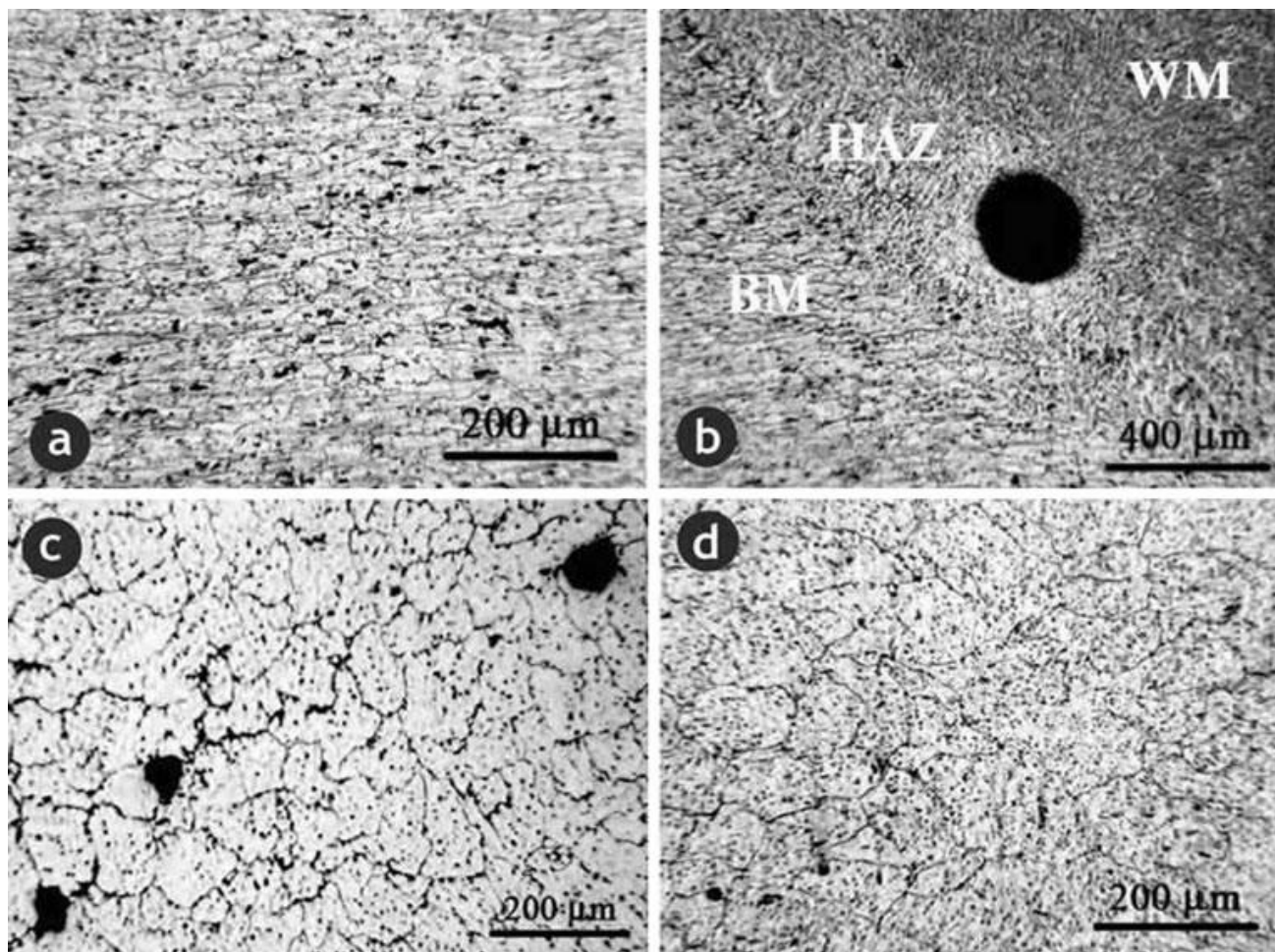
Dodavanja dušika ili vodika mješavini zaštitnih plinova se provodi kako bi poboljšali postupak zavarivanja i izgled zavora.

Poznato je da je dušik jedan od najučinkovitijih elemenata za povećanje mehaničke čvrstoće i otpora rupičastoj koroziji za austenitni nehrđajući čelik. Dušik se otapa intersticijski u austenitu i jak je stabilizator austenita. [9]



Slika 11. Utjecaj dodavanja dušika argonu na mehanička svojstva zavora [9]

Također je poznato da povećanje količine dušika u zaštitnom plinu povećava duktilnost i vlačnu čvrstoću kao i tvrdoću zavora, što je i prikazano na slici 11. Količina unesene energije određuje topljivost dušika u zavaru. Veća gustoća energije značajno utječe na smanjenje opasnosti od toplih pukotina. Dodatak dušika zaštitnim plinovima povećava čvrstoću i tvrdoću zavora austenitnog nehrđajućeg čelika. Dodatci dušika zaštitnim plinovima povećavaju napon luka i unos topline, koja povećava vršnu temperaturu i produžuje vrijeme hlađenja. To također uzrokuje i povećanje količine dušika u zavaru, te se na taj način zavar dodatno legira dušikom. [9]



Slika 12. Mikrostruktura. a) osnovni metal b) pore u ZUT-u c) zavar zavaren sa $\text{Ar}+0,015\%\text{N}_2$ d) $\text{Ar}+50\%\text{He}+0,015\%\text{N}_2$ [9]

4. Norma HRN EN ISO 14175:2008

Norma HRN EN ISO 14175:2008 definira vrste zaštitnih plinova i plinskih mješavina u procesima spajanja i zavarivanja te srodnim procesima. Svrha norme je određivanje i klasifikacija zaštitnih plinova i njihovih mješavina usklađenih s njihovim kemijskim sastavom i metalurškim ponašanjem, kao osnovu za ispravan izbor korisnika i pojednostaviti postupak izbora mješavine.

Plin i plinske mješavine prilikom isporuke mogu biti u tekućem ili plinovitom stanju, ali kad se koriste kao zaštitni plinovi moraju biti isključivo u plinovitom stanju. Norma ne obuhvaća gorive plinove kao što je acetilen, prirodni plin, propan itd., te rezonator plinova koji se koristi u plinskim laserima. [10]

Tablica 8. Svojstva plinskih komponenti [10]

Vrsta plina	Simbol	Gustoća ^a (zrak= 1,293) Kg/m ³	Relativna gustoća ^a u zraku	Točka vrenja na 0,101 MPa °C	Reaktivnost tijekom zavarivanja
Argon	Ar	1,784	1,380	-185,9	Inertan
Helij	He	0,178	0,138	-268,9	Inertan
Ugljikov dioksid	CO ₂	1,977	1,529	-78,5 ^b	Oksidirajući
Kisik	O ₂	1,429	1,105	-183,0	Oksidirajući
Dušik	N ₂	1,251	0,968	-195,8	Nisko reaktivan ^c
Vodik	H ₂	0,090	0,070	-252,8	Reducirajući
^a određeno na 0°C i 0,101 MPa (1,013 bar) ^b sublimacijska temperatura (kruto stanje prelazi u plinovito) ^c Ponašanje dušika se ovisi o materijalu i primjeni. Mogući utjecaji moraju biti razmatrani od korisnika					

4.1 Klasifikacija i označavanje

U glavnu grupu spadaju plinovi i plinske mješavine koje trebaju biti klasificirane po brojevima i simbolima norme za plinove sukladno tablici 9. Inertni plinovi i inertne mješavine M1, M2 i M3: oksidirajuće smjese koje sadrže kisik i/ili ugljikov dioksid;

C: visoko oksidirajući plinovi i visoko oksidirajuće mješavine

R: Reducirajuće plinske mješavine

N: Nisko reaktivni plinovi ili reducirajuće plinske mješavine koje sadrže dušik

O: Kisik

Z: Plinske mješavine koje sadrže komponente koje nisu navedene u normi ili smjese izvan

sastava raspona navedenih u tablici 9

Sve glavne grupe, osim Z grupe su podijeljene u podgrupe. Podjela se vrši na temelju prisutnosti i razini različitih komponenti koje imaju utjecaja na reaktivnost. Označavanje plinova i plinskih mješavina se odvija prema klasifikaciji i simbolima od njihovih kemijski komponenti, nakon toga se upisuju volumni postotci.

Simboli kemijskih komponenti:

Ar – argon

C – ugljikov dioksid

H – vodik

N – dušik

O – kisik

He – helij

Za plinske smjese koje sadrže komponente navedene, ali su izvan opsega u tablici 9., slovo Z se postavlja ispred. [10]

Tablica 9. Klasifikacija plinskih postupaka za postupke zavarivanja i srodnih postupka [10]

Simbol		Komponente u nazivnim postotcima volumena					
Gl. grupa	Pod-grupa	Oksidirajuća		Inertna		Reducir- ajuća	Nisko reaktivna
		CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂
I	1			100			
	2				100		
	3			ravnoteža	0,5 ≤ He ≤ 95		
M1	1	0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5		ravnoteža ^a		0,5 ≤ H ₂ ≤ 5	
	2	0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5		ravnoteža ^a			
	3		0,5 ≤ O ₂ ≤ 3	ravnoteža ^a			
	4	0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5	0,5 ≤ O ₂ ≤ 3	ravnoteža ^a			
M2	0	5 < CO ₂ ≤ 15		ravnoteža ^a			
	1	15 < CO ₂ ≤ 25		ravnoteža ^a			
	2		3 < O ₂ ≤ 10	ravnoteža ^a			
	3	0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5	3 < O ₂ ≤ 10	ravnoteža ^a			
	4	5 < CO ₂ ≤ 15	0,5 ≤ O ₂ ≤ 3	ravnoteža ^a			
	5	5 < CO ₂ ≤ 15	3 < O ₂ ≤ 10				
	6	15 < CO ₂ ≤ 25	0,5 ≤ O ₂ ≤ 3	ravnoteža ^a			
	7	15 < CO ₂ ≤ 25	3 < O ₂ ≤ 10	ravnoteža ^a			
M3	1	25 < CO ₂ ≤ 50		ravnoteža ^a			

	2		10< O2 ≤ 15	ravnoteža ^a			
	3	25< CO2 ≤ 50	2< O2 ≤ 10	ravnoteža ^a			
	4	5< CO2 ≤ 25	10< O2 ≤ 15	ravnoteža ^a			
	5	25< CO2 ≤ 50	10< O2 ≤ 15	ravnoteža ^a			
C	1	100					
	2	ravnoteža	0,5≤ O2 ≤ 30				
R	1			ravnoteža ^a		0,5≤ H2 ≤ 15	
	2			ravnoteža ^a		15< H2 ≤ 50	
N	1						100
	2			ravnoteža ^a			0,5≤ N2 ≤ 5
	3			ravnoteža ^a			5< N2 ≤ 50
	4			ravnoteža ^a		0,5≤ H2 ≤ 10	0,5≤ N2 ≤ 5
	5					0,5≤ H2 ≤ 50	ravnoteža
O	1		100				
Z	Plinske mješavine koje sadrže komponente koje nisu navedene, ili mješavine izvan navedenog raspona sastava. ^b						
^a Za svrhu klasifikacije, argon može biti djelomično ili potpuno zamijenjen helijem							
^b Mješavina dva plina sa istom Z klasifikacijom ne može biti izmjenjiva.							

4.2 Toleriranije mješavine

Tolerancije odstupanja pojedinih komponenti u mješavinama određuju se u volumenskim postocima u skladu s tablicom 10. [10]

Tablica 10. Tolerancija komponenti u mješavini

Komponenta normalne koncentracije plina	Dopuštena tolerancija
> 5	± 10 % od normalne koncentracije
1 do 5	$\pm 0,5$ % apsolutne koncentracije
< 1	Nije određeno u ovoj normi

5. Zaštitni plinovi u praksi

U primjeru iz prakse korišten je uzorak od visokolegiranog austenitnog Cr-Ni čelika ANSI 304 dimenzija 5x110x200 mm. Navarivanje na uzorku je izvedeno u horizontalnom položaju (PA). Prilikom navarivanja kontinuiranim strujama korišten je robot za zavarivanje. Uzorak je hlađen na zraku do temperature okoliša. [6]

Zaštitni plinovi koji su korišteni su: argon, mješavina argona i 2,5% vodika, mješavina argona i 5% vodika i mješavina argona i 7,5 % vodika.

Kod prvog uzorka kao zaštitni plin korišten je čisti argon, na slici 13 se može vidjeti izgled zavora za različite jačine struje zavarivanja. 1.) 50A, 2.) 90A i 3.) 130 A



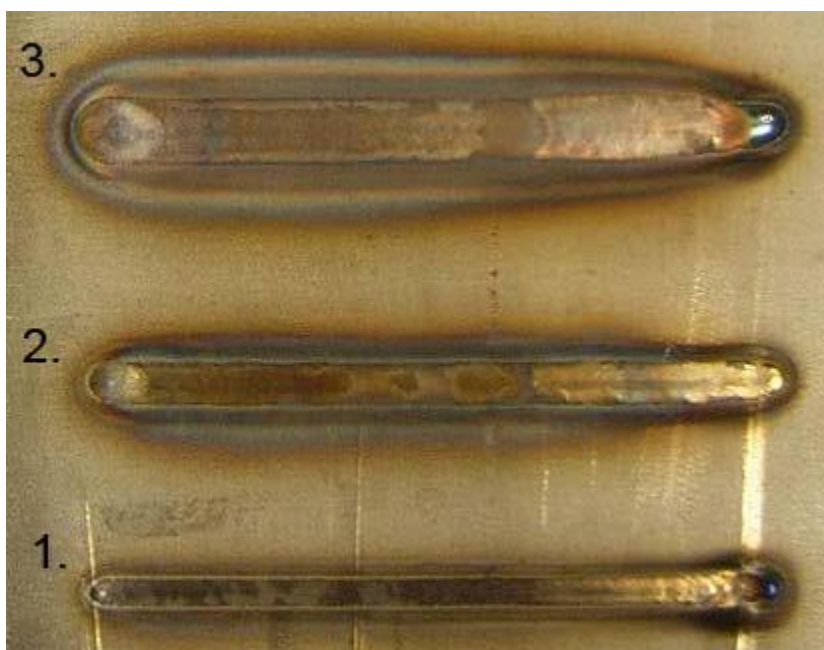
Slika 13. Uzorak 1 zaštićen čistim argonom [6]

Kod drugog uzorka kao zaštitni plin korišten je $\text{Ar} + 2.5\% \text{H}_2$, na slici 14 se može vidjeti izgled zavora za različite jačine struje zavarivanja.



Slika 14. Uzorak 2 zaštićen argonom + 2.5% vodika [6]

Kod trećeg uzorka kao zaštitni plin korišten je $\text{Ar} + 5\% \text{H}_2$, na slici 15 se može vidjeti izgled zavora za različite jačine struje zavarivanja



Slika 15. Uzorak 3 zaštićen argonom + 5% vodika [6]

Kod četvrtog uzorka kao zaštitni plin korišten je $\text{Ar} + 7.5\% \text{H}_2$, na slici 16 se može vidjeti izgled zavora za različite jačine struje zavarivanja.



Slika 16. Uzorak 4 zaštićen argonom + 7.5% vodika [6]

Tablica 11. Izgled i dimenzije mikroizbruska uzorka za struju 50 A

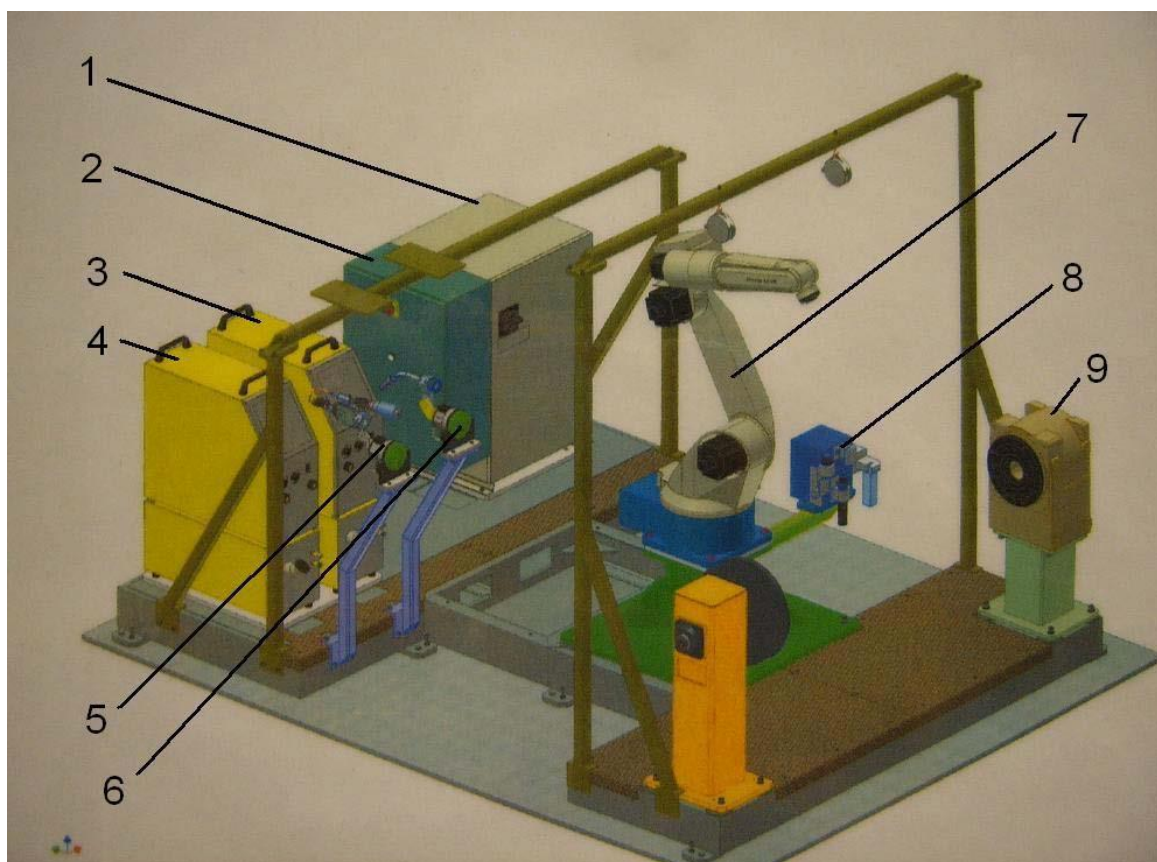
Uzorak 1			Uzorak 2		
	Zaštitni plin	Širina [mm]		Zaštitni plin	Širina
	Ar	Nije uočena		Ar + 2,5H ₂	2,64mm
Uzora 3			Uzorak 4		
	Zaštitni plin	Širina		Zaštitni plin	Širina [mm]
	Ar + 5%H ₂	2,6 mm		Ar+7,5%H ₂	2,87mm
Penetracija			Penetracija		
Nije uočena			1 mm		
1,33 mm			1,6 mm		

6. Eksperimentalni rad

Cilj eksperimentalnog dijela rada je usporediti utjecaj zaštitnih plinova na navar načinjen robotiziranim TIG postupkom. U eksperimentu je korišten kao osnovni materijal visokolegirani nehrđajući čelik AISI 304, a kao zaštitni plin korišten je čisti argon i mješavina argona s udjelom od 5 % vodika. Analizom dobivenih podataka potrebno je za pojedine razine unosa topline ustanoviti moguća poboljšanja produktivnosti i razlike u geometriji zavara.

6.1 Oprema za navarivanje

Navarivanje je izvedeno na robotskoj stanici Varstroj VRC-1G MIG + 1G TIG / 1dm, koja se nalazi u Laboratoriju katedre za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Robotska stanica je korištena u eksperimentu kako bi se eliminirao utjecaj zavarivača i dobili što točniji rezultati ispitivanja. Slika 17 prikazuje robotsku stanicu Varstroj VRC-1G MIG + 1G TIG / 1dm.



Slika 17. Robotska stanica Varstroj VRC-1G MIG + 1G TIG / 1dm [11]

Robotska stanica sastoji se od:

1. Električne jedinice;
2. Upravljačke jedinice;
3. Izvora struje MIG/MAG VPS 4000 (Varstroj);
4. Izvora struje TIG VARTIG 3500 DC/AC (Varstroj);
5. Pištolja za TIG zavarivanje;
6. Pištolja za MIG/MAG zavarivanje;
7. Robota OTC Almega AX-V6;
8. Uređaja za rezanje žice i nanošenje sredstva protiv naljepljivanja kapljica;
9. Pozicionera P250V ROBO.

Glavni dio robotske stanice je robotski manipulator OTC Almega AX-V6 koji se sastoji od robotske ruke s tri rotacijske slobode gibanja i ručnog zgloba s još tri rotacije, što čini šest stupnja slobode gibanja robotskog manipulatora, a prikazan je na slici 18. Na vrhu ručnog zgloba pričvršćen je pištolj za TIG zavarivanje koji se može promijeniti sa sustavom za automatsku izmjenu pištolja.



Slika 18. Robotski manipulator Almega AX-V6

Opisani robotski sustav ima dvije stanice za spremanje pištolja, jednu za MIG/MAG, a drugu za TIG pištolj. Ručni zglob je opremljen „shock“ senzorom koji zaustavlja robot u slučaju sudara. Robotska stanica se sastoji još od privjeska za učenje (engl. teach pendant), upravljačke jedinice i operatorskog panela.

Pomoću privjesaka za učenje se neposredno upravlja svim dijelovima robotske stanice sa središnjeg mjesta i to po svim upravljivim parametrima. Najvažnija funkcija privjeska za učenje je mogućnost programiranja na licu mjesta (online programiranja) pomoću jednostavnog ali sveobuhvatnog programskog jezika koji potom upravljačka jedinica interpretira i izvršava.

Upravljačka jedinica također pohranjuje programe lokalno i/ili na server, ako se poveže na standardnu lokalnu računalnu mrežu. Drugi način programiranja robotske stanice je „offline programiranje“, koje se vrši pomoću simulacije robotske stanice na osobnom računalu korištenjem specijalnih programskih paketa, te se gotov program prebacuje na upravljačku jedinicu.

Kada se robotska stanica isprogramira, operater pokreće i prema potrebi zaustavlja program pomoću vrlo jednostavnog operatorskog panela.

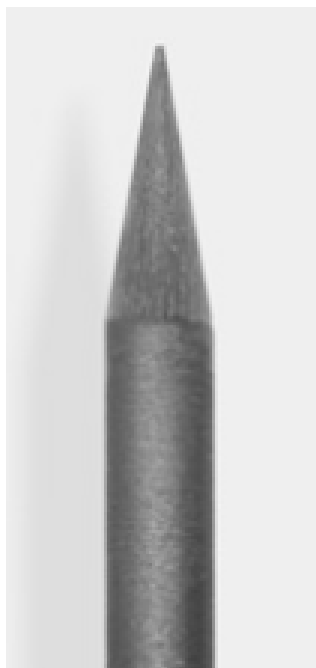


Slika 19. Privjesak za učenje (ljevo), upravljačka jedinica Almega AX-C (sredina), operatorski panel (desno)

Pištalj za TIG postupak zavarivanja koji se koristio u eksperimentalnom radu je bio priključena na istosmjernu struju, a polaritet elektrode je bio negativan. Udaljenost elektrode od sapnice je bila 4 mm, a početna udaljenost elektrode od radnog komada je bila 3 mm.

6.2 Izbor elektrode

Austenitni čelici se zavaruju istosmjernom strujom s negativnim polaritetom elektrode, a preporučena jačina struje je u rasponu od 70 – 250 A ovisno o debljini materijala. U eksperimentu je korištena elektroda promjera 1,6 mm legirana s torijevim oksidima. Karakteristike elektroda legiranih torijevim oksidima su: dug vijek trajanja, otporne na veće struje i imaju stabilan luk kod istosmjerne struje, ove elektrode su detaljnije objašnjene u poglavlju 2.2. Preporučeni izgled vrha elektrode prikazan je na slici 20. Elektroda ovakvog oblika namijenjena je za automatizirano i robotizirano zavarivanje. S obzirom da se koristi elektroda negativnog polariteta kada nema pojave efekta čišćenja, potrebno je prije navarivanja ručno provesti čišćenje površine radnog komada. Električni luk kod šiljastih elektroda ima usku i duboku penetraciju u osnovni materijal.



Slika 20. Izgled elektrode kod istosmjerne struje [5]

6.3 Osnovni materijal

Austenitni čelik sniženog masnog udjela ugljika kvalitete AISI 304 - W.Nr 1.4301 je nehrđajući čelik dobre čvrstoće i odlične korozijske otpornosti. Toplinska i električna vodljivost nije im izražena u usporedbi s bakrenim legurama i nisu magnetični. U atmosferskim uvjetima čelik AISI 304 je otporan na koroziju, čak i uz prisustvo kiseline kao što je dušična kiselina. Materijal ima odličnu otpornost u alkalnim otopinama, kao što su organske ili anorganske soli. Široku primjenu imaju u prehrambenoj (pivovare, vinarije, mljekare) i naftnoj industriji (spremnici kemikalija), a u novije vrijeme sve se češće primjenjuje u arhitekturi. Razni oblici “pitting” korozije javljaju se samo u toplim atmosferama s većom koncentracijom klorida. U tablici 12. prikazana su mehanička svojstva čelika, a u tablici 13. nalazi se kemijska analiza materijala AISI 304.

Tablica 12. Mehanička svojstva niskougljičnog austenitnog čelika (ELC) [12]

Oznaka čelika			Sastav “ostalo“, maseni	Mehanička svojstva				
EN	stara HRN	AISI		Rm, min	Rp0,2, min	A5, min	Z, min	KU, min
				[N/mm ²]	[N/mm ²]	%	%	[J]
X2CrNi18-9	Č45701	304 L	-	450...700	175	50	60	85

Tablica 13. Kemijska analiza AISI 304 ploče debljine 5 mm [13]

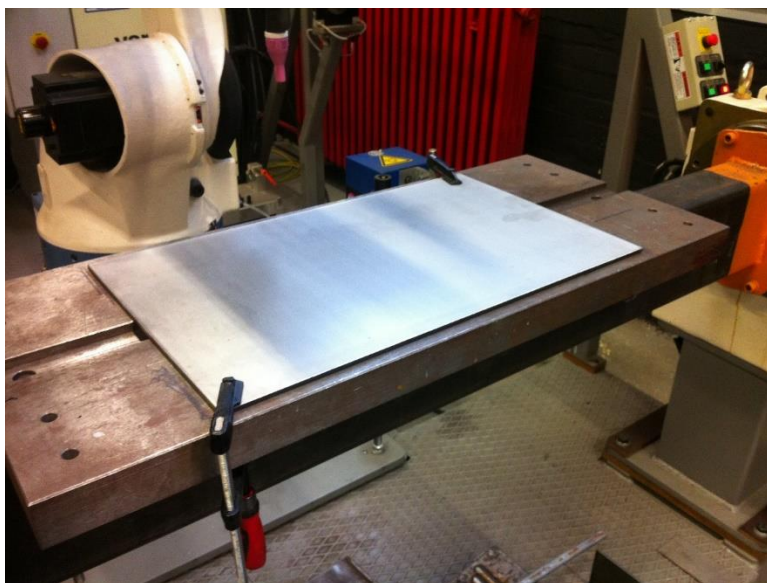
C	Fe	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	V	Cu
0,08	71,75	18	7,81	1,32	0,262	0,32	0,19	0,34

Tablica 14. Fizikalna svojstva za AISI 304

Svojstvo	Vrijednost
Gustoća	8.00 g/cm ³
Točka taljenja	1400-1450°C
Modul elastičnosti	193 GPa
Električni otpor	0.072x10 ⁻⁶ Ω.m
Toplinska vodljivost	16.2 W/m K na 100°C
Toplinsko rastezanje	17.2x10 ⁻⁶ /K na 100°C

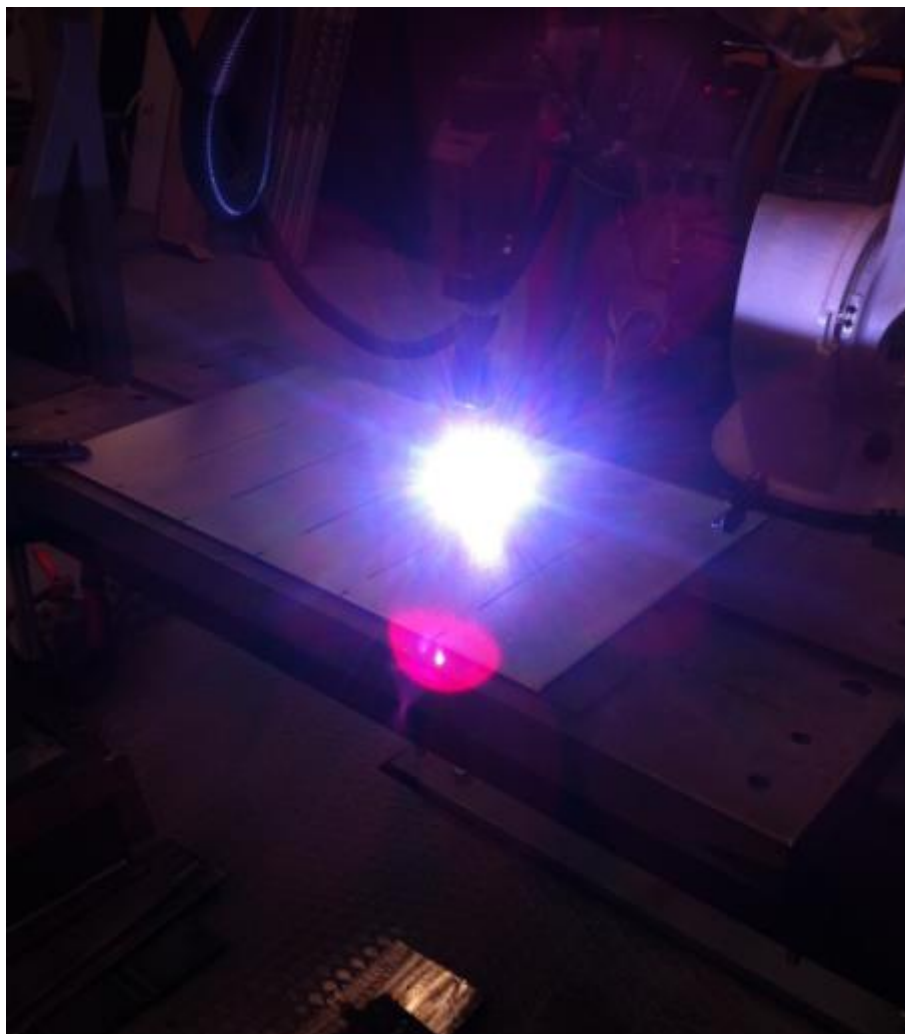
6.4 Navarivanje

Precizna priprema uzorka prethodila je samom TIG navarivanju. Relativno slaba toplinska vodljivost austenitnih čelika i podložnost deformacijama prilikom navarivanja normalna je pojava, zato je potrebno dobro pričvrstiti radni komad stegama, kao što je prikazano na slici 21. Uloga stega je da fiksiraju radni komad što posljedično umanjuje mogućnost pogreške uzrokovane neravnomjernim razmakom između elektrode i radnog komada.



Slika 21. Prikaz stezanja uzorka

Proces navarivanja odvijao se na ploči visoko legiranog austenitnog Cr – Ni čelika AISI 304 debljine 5 mm na koji je navareno šest navara. Zaštitni plinovi koji su se koristili za vrijeme navarivanja su bili čisti argon i mješavina argona i 5% vodika, a kod svakog plina primjenjene su tri različite jačine struje (80 A, 95 A i 110 A). Prilikom navarivanja korišten je robot za zavarivanje kako bi se izbjegao utjecaj zavarivača, a navarivanje na svakoj ploči je izvedeno u horizontalnom položaju (PA). U tablici 15 su prikazani parametri koji su korišteni prilikom navarivanja. Protok plina i brzina navarivanja tijekom cijelog ispitivanja su bili konstantni i iznosili se 9 l/min protok plina odnosno brzina navarivanja 12 cm/min.




Slika 22. Prikaz procesa navarivanja

Tablica 15. Parametri navarivanja


Uzorak	Jačina struje [A]	Napon [V]	Zaštitni plin
1	80	10,2	100 % Ar
2	95	10,8	100 % Ar
3	110	11,2	100 % Ar
4	110	14,3	95 % Ar i 5 % H ₂
5	95	13,5	95 % Ar i 5 % H ₂
6	80	11,2	95 % Ar i 5 % H ₂

Uporabom različitih zaštitnih plinova razlika u izgledu navara se može primjetiti golim okom. Prisustvom vodika u smjesi zaštitnih plinova kao plina dobre toplinske vodljivosti uzrokuje povećan unos topline što za posljedicu ima veću širinu navara kod jednakih jačina struje. Tablice 16, 17 i 18 Prikazuju parametre i izgled navara za različite jačine struje.


Tablica 17. Parametri i izgled navara za jačinu struje od 80 A

				
Broj navara	U [V]	v_z [cm/min]	Q [l/min]	Vrsta plina
1	10,2	12	9	Ar
6	11,2	12	9	Ar + 5% H ₂

Tablica 18. Parametri i izgled navara za jačinu struje od 95 A

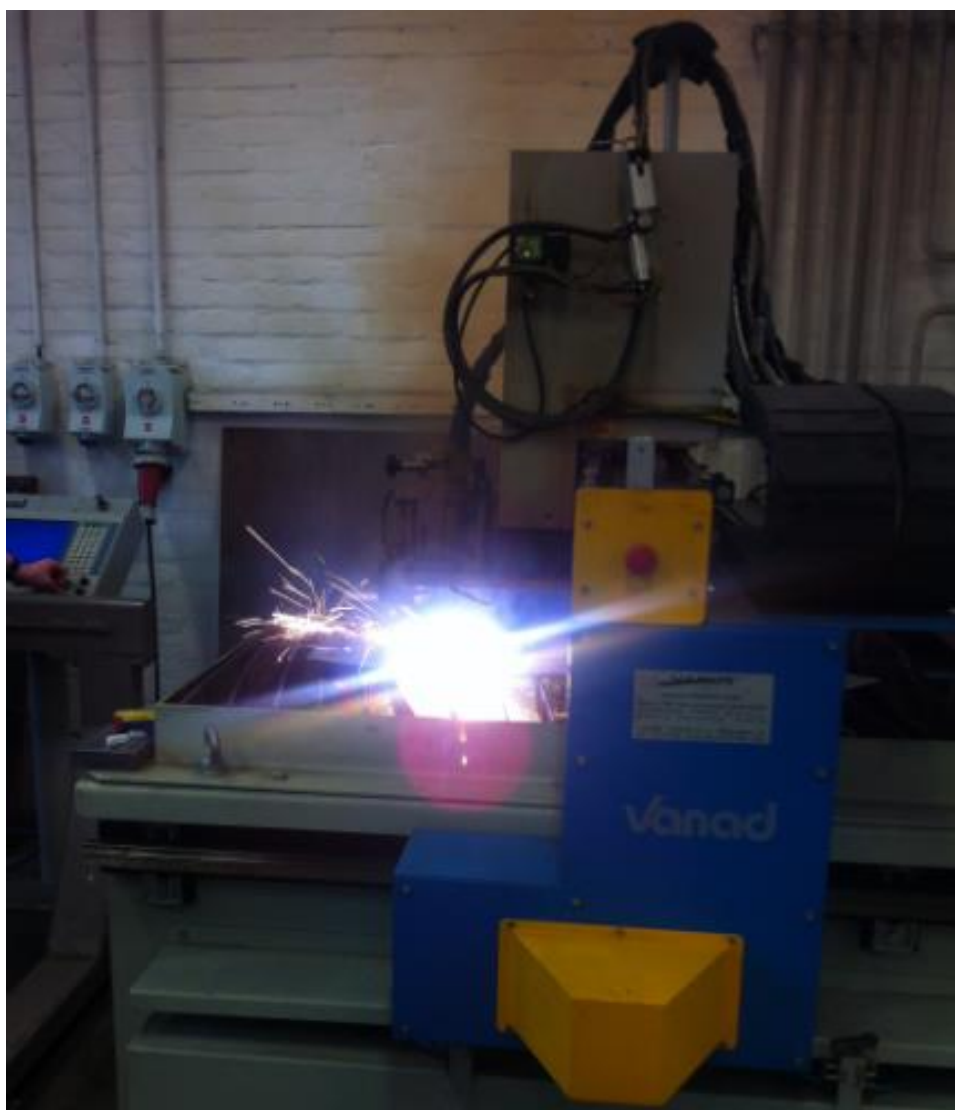
				
Broj navara	U [V]	v_z [cm/min]	Q [l/min]	Vrsta plina
2	10,8	12	9	Ar
5	13,5	12	9	Ar + 5% H ₂

Tablica 19. Parametri i izgled navara za jačinu struje od 110 A

				
Broj navara	U [V]	v_z [cm/min]	Q [l/min]	Vrsta plina
3	11,2	12	9	Ar
4	14,3	12	9	Ar + 5% H ₂

6.5 Izrada makroizbruska

Nakon zavarivanja potrebno je pripremiti uzorke za izradu makroizbruska. Izrada makroizbruska sastoji se od dvoje faze: skraćivanja uzorka te brušenja i poliranja uzorka. Skraćivanje uzorka na manje dimenzije je potrebno kako bi se dobio poprečni presjek zavara. Skraćivanje uzorka je izvedeno tehnologijom plazma rezanja na troosnom pozicionom CNC stroju za rezanje i zavarivanje PROXIMA KOMPAKT 10/20 češkog proizvođača VAND spol. s. r. o.



Slika 23. CNC stroj za plazma rezanje

Dobiveni uzorci nakon plazma rezanja su grubi, pa ih je potrebno na brusilici izbrusiti. Izbrusci su prvo izbrušeni grubom brusnom pločom na stupnoj brusilici.

Nakon grubog brušenja uzorci su fino brušeni brusnim papirom različitih granulacija kako bi se dobila potrebna kvaliteta za poliranje. Granulacije kojima su obrađivani uzorci ručno su redom P320, P400, P500 i za krajnju finu obradu P600.

Zbog potrebne kvalitete odrađeno je naknadno poliranje uzoraka na uređaju Phoenix Alpha Grinder Polisher na kojem se kao sredstvo za hlađenje koristi voda, a koji je prikazan na slici 24. Uzorci su se brusili na brusnom papiru od silikon-karbida granulacije P 2000 i P 4000.



Slika 24. Phoenix Alpha Grinder Polisher

Na ispoliranim makrouzorcima nije bilo nikakvih znakova pora, uključaka ili bilo kakvih nepravilnosti koje bi se mogle uočiti vizualnom kontrolom što ukazuje da je postupak navarivanja izveden pravilno i u granicama dozvoljenih parametara. Nakon poliranja uzorke je bilo potrebno nagristi.

Nagrizanje je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala, FSB. Uzorci su bili izloženi elektrolitskom nagrivanju u 10 % oksalnoj kiselini pod naponom od 4-5 V i jačinom struje od 1 A, a cijeli postupak nagrivanja trajao je oko 3 minute. Nakon nagrivanja do izražaja su došla područja zahvaćena električnim lukom tj. područje navara, zona taljenja i zona utjecaja topline poslije čega je svaki uzorak ispran destiliranom vodom kako bi se zaustavila kemijska reakcija, kasnije su uzorci isprani alkoholom kako bi se uklonile nečistoće i nakraju osušeni na zraku.

Na tako obrađenim uzorcima dobivena je vidljiva razlika u poprečnom presjeku između navara i osnovnog materijala, te dubina penetracije.

6.6 Analiza makroizbruska

Ispolirani i nagriženi makroizbrusci su analizirani na mikroskopu Leica MZ6 koji se nalazi u Laboratoriju za zaštitu materijala, FSB. Vodik je poznat kao plin dobre toplinske vodljivosti i dodavanjem određenih količina vodika argonu povećava se napon električnog luka i brzina navarivanja kao posljedica povećanog unosa topline. Zbog konstantne brzina navarivanja navari kod kojih je kao zaštitni plin korištena mješavina argona sa udjelom od 5 % vodika imaju veću širinu od onih kod kojih je kao zaštitni plin korišten čisti argon. U tablicama 21 i 22 je prikazan izgled makroizbrusaka i njihovi parametri, a na slici 25 prikazane su dimenzije navara i geometrija.

Unos topline moguće je izračunati pomoću formule :

$$Q = \frac{I_z \times U_z \times 60 \times \eta}{v \times 1000}$$

Gdje je : Q = Unos topline [kJ/mm]

I_z = Struja zavarivanja [A]

U_z = Napon [V]

η = koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja ($\eta = 0,6$ za TIG postupak)

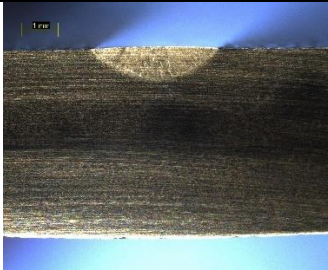
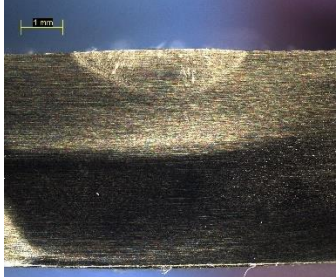
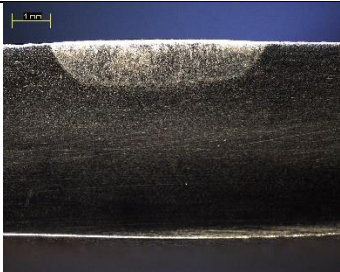
v = brzina za navarivanja [mm/min]

$$Q = \frac{I_z \times U_z \times 60 \times \eta}{v \times 1000} = \frac{80 \times 10,2 \times 60 \times 0,6}{120 \times 1000} = 0,2448$$

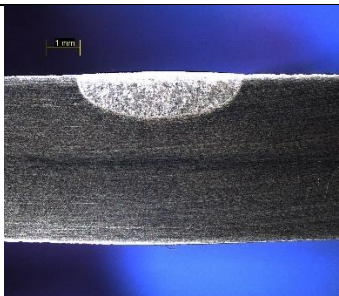

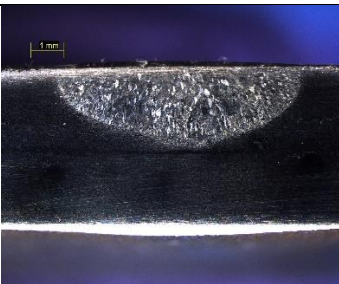
Tablica 20. Prikaz unosa topline po uzorku

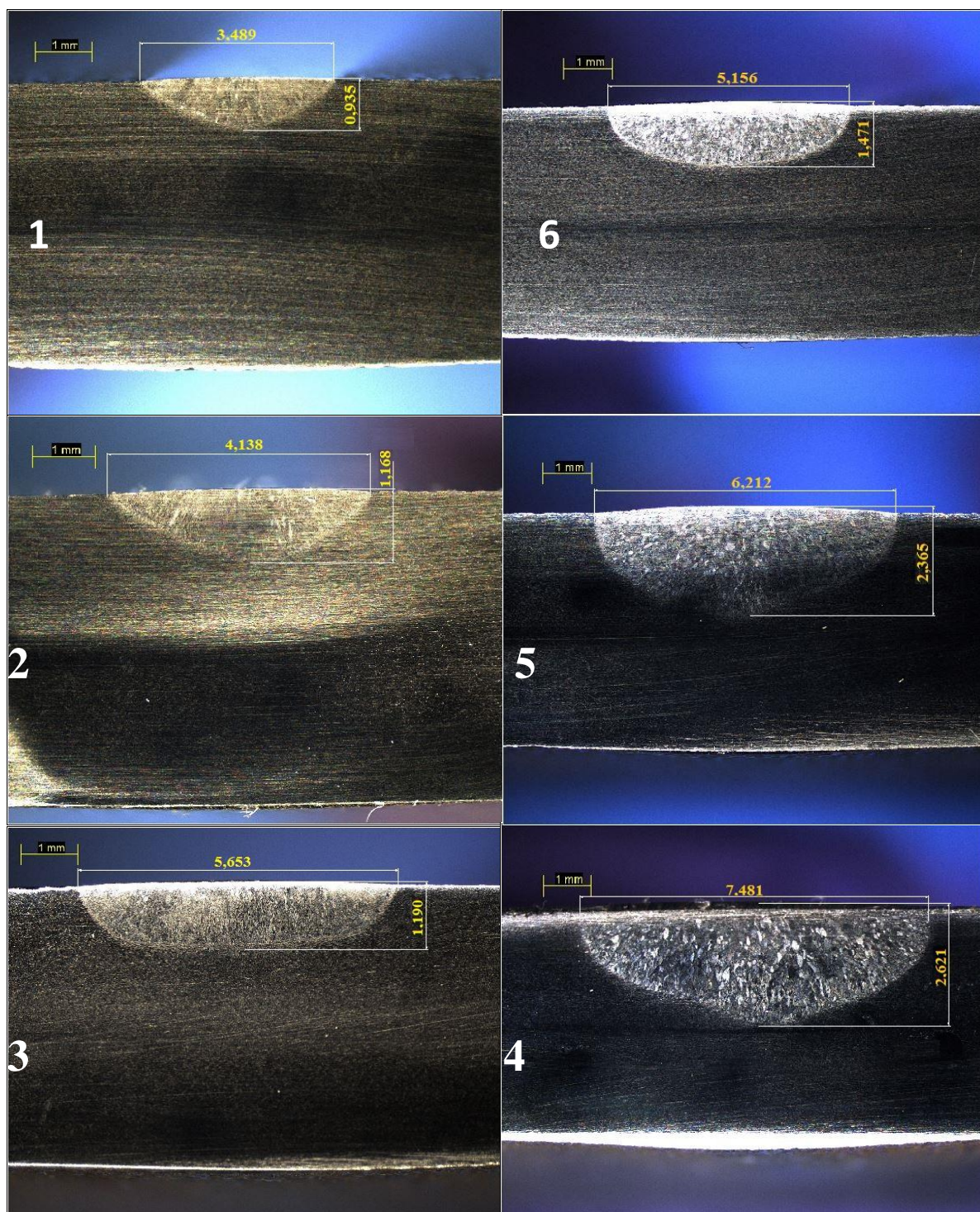
Uzorak	I [A]	U [V]	v [mm/min]	Zaštitni plin	Unos topline [kJ/mm]
1	80	10,2	120	Ar	0,2448
2	95	10,8	120	Ar	0,3078
3	110	11,2	120	Ar	0,3696
4	110	14,3	120	Ar + 5% H ₂	0,4719
5	95	13,5	120	Ar + 5% H ₂	0,38475
6	80	11,2	120	Ar + 5% H ₂	0,2688

Tablica 21. Izgled makrouzoraka kod kojih je kao zaštitni plin korišten čisti Ar

Uzorak	Makroizbrusci	Jakost struje [A]	Napon [V]
1		80	10,2
2		95	10,8
3		110	11,2

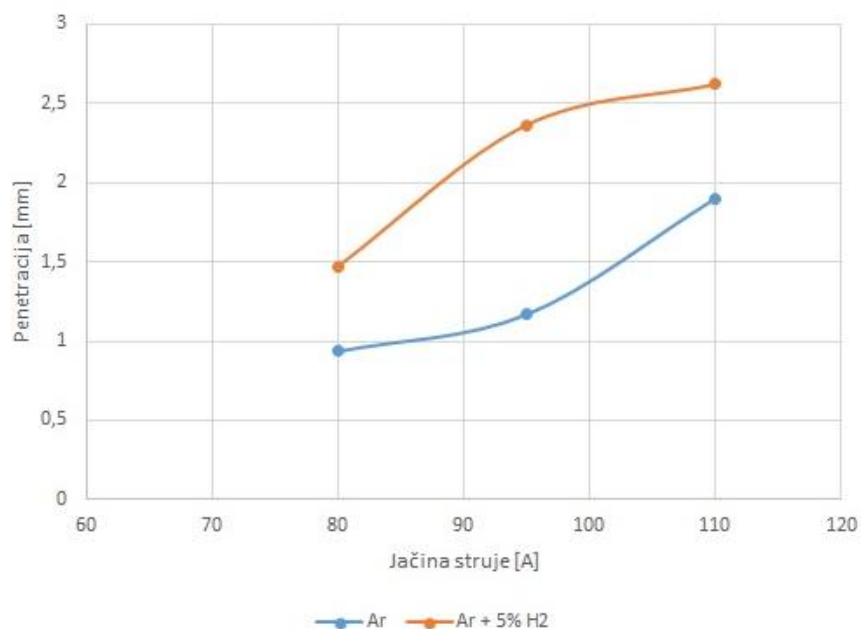
Tablica 22. Izgled makrouzoraka kod kojih je kao zaštitni plin korištena mješavina argona s udjelom od 5 % vodika

Uzorak	Makroizbrusci	Jakost struje [A]	Napon [V]
6		80	11,1
5		95	13,5
4		110	14,3

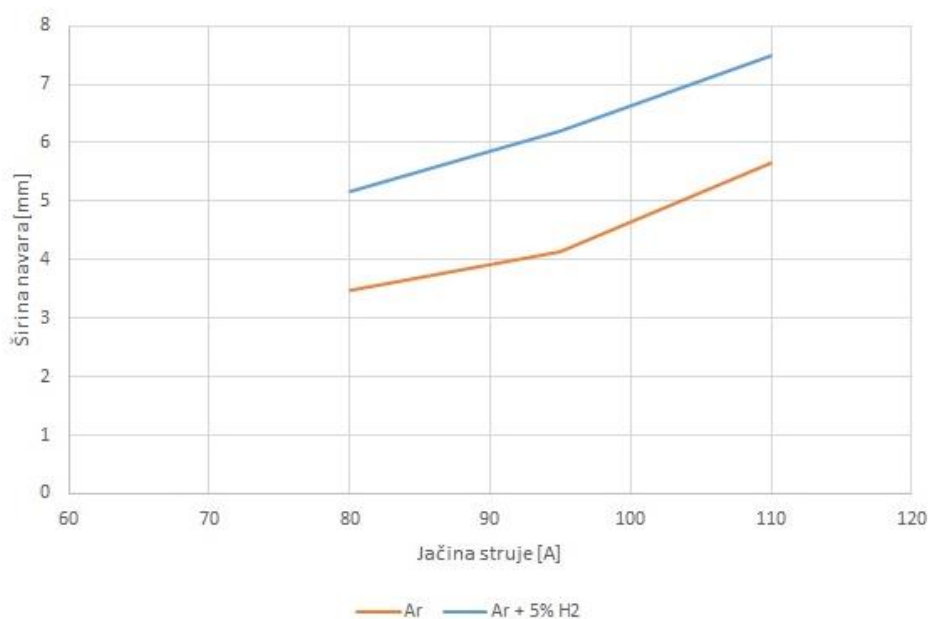


Slika 25. Usporedba makrouzorka navarenog pod zaštitom čistog Ar (1,2,3) i makrouzorka navarenog pod zaštitom Ar + 5 % (4, 5, 6)

Na slikama 26 i 27 grafički su uspoređene dobivene vrijednosti penetracije i širine navara prilikom navarivanja pod zaštitom argona i pod zaštitom mješavine argona s udjelom 5% vodika. Na grafovima se vidi da su penetracija i širina navara veće prilikom navarivanja pod zaštitom mješavine argona s udjelom 5% vodika te povećanjem jačine struje povećavaju se i penetracija i širina navara.



Slika 26. Grafički prikaz ovisnosti penetracije o jačini struje



Slika 27. Grafički prikaz ovisnosti širine navara o jačini struje

7. Zaključak

Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je utvrditi utjecaj različitih plinova na produktivnost navarivanja te izgled i kvalitetu navara. U radu je uspoređen utjecaj čistog argona i mješavine argona s udjelom 5 % vodika na izgled i kvalitetu navara kod visokolegiranih austenitnih Cr-Ni čelika AISI 304. Navari su izvedeni na robotu kako bi se eliminirao utjecaj zavarivača te kako bi se dobili što točniji podatci za analizu. U eksperimentu su se koristile po tri jačine struje za svaki plin 80 A, 95 A i 110 A.

Zaštitni plinovi pored svoje primarne zadaće da štite navar od utjecaja atmosfere imaju i značajan utjecaj na sam tehnološki proces i kvalitetu navarivanja.

Analizom dobivenih rezultata utvrdilo se da utjecaj vodika u mješavinama ima velik utjecaj na unos topline i na dubinu i širinu navara. Navari kod kojih se kao zaštitni plin koristio čisti argon za jednake jačine struje izmjerena im je manja penetracija i manja širina navara nego kod mješavina argona s udjelom 5% vodika. Primjenom vodika u zaštitnim plinovima kod jednake jačine struje (95 A) penetracija se povećala sa 1,168 na 2,365 mm, a širina navara sa 4,138 na 6,212. Razlog tome je što vodik u mješavini utječe na povećanje energije električnog luka. Najbolja penetracija u iznosu od 2,621 mm je postignuta za jačinu struje od 110 A, a kao zaštita koristila se mješavina argona s udjelom 5% vodika. Vodik ima dobru toplinsku vodljivost tako da se kod mješavina koje imaju određenu količinu vodika povećava brzina navarivanja zbog povećanog unosa topline. Povećanje unosa topline je izravna posljedica povećanja napona luka. Nehrdajuće čelike karakterizira slaba toplinska vodljivost i podložnost deformacijama. Zbog povećanog unosa topline prilikom navarivanja kad se kao zaštita koriste plinske mješavine koje sadrže vodik postoji veća opasnost pojave deformacija na nehrđajućim čelicima nego kad bi se kao zaštitni plin koristio čisti argon. Upotrebom mješavine argona s udjelom 5% vodika možemo utjecati na troškove zavarivanja i navarivanja jer zbog veće penetracije, brzine zavarivanja i širene zavera neke dijelove možemo zavariti iz jednog prolaza također, zbog veće penetracije kod određenih debljina osnovnog materijala nije potrebna posebna priprema spoja čime se štedi i vrijeme i novac.

8. Literatura

- [1] The Welding Institute; Predavanja; Tečaj za međunarodne inženjere i tehnologe zavarivanja; Postupci zavarivanja i oprema za zavarivanje; listopad, 2012.
- [2] Messer Plin; Zaštitni plinovi za zavarivanje; Odabrane tablice; rujan, 2005.
URL: http://www.messergroup.com/mostar/O_nama/Za__titni_plinovi_za_zavarivanje_.pdf
(25.1.2015)
- [3] Welding Handbook- eight edition- Gas Tungsten arc welding; 1997., AWS
- [4] Welders Handbook For Gas Shielded Arc Welding, Oxy Fuel Cutting & Plasma Cutting; 1999., Air Products
- [5] Handbook for GTAW – Gas Tungsten Arc Welding, 2005., Miller
- [6] Dino Branilović; Utjecaj zaštitnog plina pri TIG zavarivanju Cr-Ni čelika na geometrijske značajke zavora; Završni rad 2011., FSB
- [7] Darko Ćordaš; 4. SEMINAR: Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici); Orbitalno zavarivanje nehrđajućih čelika TIG postupkom; 2005., URL:
<http://www.dtzi.hr/upload/pdf/4.%20SEMINAR/3.%20RAD.pdf>; (25.1.2015.)
- [8] Marko Horvat, Veljko Kondić, Dražen Brezovečki; Some theoretical and practical basis of GTAW welding process; Technical journal 8, 4(2014), str 426-432
- [9] P. Kah, J. Martikainen; Influence of shielding gases in the welding of metals; Springer Int J Adv Manuf Technol (2013.) 64:1411–1421
- [10] International standard ISO 14175:2008; Gases and gas mixtures for fusion welding and allied processes
- [11] Varstroj katalog proizvoda, <http://www.varstroj.si>, 21.02.2011.
- [12] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof; Svojstvo i primjena materijala; FSB, Zagreb, 2007.
- [13] Luka Čolić; Robotizirano zavarivanje nehrđajućih čelika A-TIG postupkom; Diplomski rad 2015., FSB